

文章编号:1000-582X(2009)10-1165-04

水平环缝内冷水自然对流换热实验

唐经文¹, 王林豪¹, 高 诚¹, 梁鑫俐², 李 佳¹

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆元隆装饰设计工程有限公司, 重庆, 400010)

摘 要:对水平环缝内冷水自然对流换热性能进行了实验研究。水平环缝宽度为6~18 mm, 外壁温度维持0℃, 换热温差为2~24℃。结果表明, 在实验范围内, 内壁面的平均表面传热系数随环缝宽度的增大而增加; 当温差小于4℃或大于8℃时, 平均表面传热系数随温差的增大而增大, 在4~8℃范围内, 随温差的增大而减小。采用逐步线性回归方法, 得到了内壁传热关联式。

关键词:自然对流; 传热特性; 水平环缝

中图分类号:TK124

文献标志码:A

Experimental study on natural convection of cold water near the maximum density in horizontal annulus

TANG Jing-wen¹, WANG Lin-hao¹, GAO Cheng¹, LIANG Xin-li², LI Jia¹

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Chongqing yuanlang decoration design engineering co. ltd, Chongqing 400010, P. R. china)

Abstract: This paper conducts the experimental study on the natural convection characteristics of cold water near the maximum density in horizontal annulus with the fixed inner radius $r_i = 14$ mm and different width $l = 6 \sim 18$ mm. The temperature at outer wall is maintained at 0℃, and the temperature differences between the inner and outer walls range from 2 to 24℃. The results show that the heat transfer coefficient at inner wall increases with the increase of the annulus width. When the temperature difference is bellow 4℃ or above 8℃, the heat transfer coefficient increases with the increase of the temperature difference. When the temperature difference is between 4℃ and 8℃, it decreases with the increase of the temperature difference. The formula of heat transfer at inner walls is obtained by using the method of linear regression.

Key words: natural convection; heat transfer; horizontal annulus

自然对流是由流体内部的温度差或浓度差引起的密度差作用而产生的。自然界和工业生产领域存在大量的自然对流现象, 因此, 自然对流已成为众多学者非常感兴趣的研究课题, 例如, 建筑室内通风过程的自然对流、太阳能热利用中的自然对流、以及冰蓄冷空调在融冰时冷水的自然对流等。对绝大多数工质而言, 物体的密度随温度升高而线性减小, 即满足 Boussinesq 假设, 但是, 水的密度有其独有的特性, 其在 4℃ 附近有最大值, 该点称为密度转置点,

这就使得转置点附近水的自然对流变得更加复杂和有趣。

目前, 已有许多学者完成了矩形腔内水在密度转置点附近的二维自然对流流型和传热特性的研究^[1-9], 同时, 还进行了垂直圆筒内和水平环缝内水在密度最大值附近的自然对流实验^[10-14], 并观察到了各种流型的存在。最近, 彭岚等^[15]进行了水平环缝内冷水自然对流二维数值模拟, 得到了内壁的对流换热关联式。笔者依据 1 组水平环缝内水在密度

收稿日期:2009-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50976129); 国家大学生创新性实验项目(CQU CX-G-2007-29)

作者简介:唐经文(1951-), 男, 重庆大学高级工程师, 主要从事热物理测试研究, (E-mail) tangjinw@cqu.edu.cn.

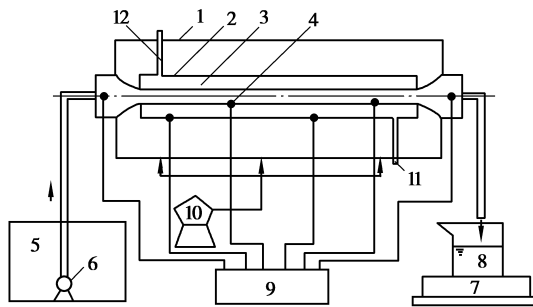
转置点附近的自然对流的结果,重点分析内壁面的对流换热性能。

1 实验装置与过程

实验系统见图 1。水平环缝由内、外套管构成,内管外直径(水平环缝内直径 d_i)为 14 mm,外管内直径(即水平环缝外直径 d_o)为 26 mm, 38 mm 或 50 mm,实验段长 400 mm,内外套管都为紫铜管。从水平环缝内的下部充入二次蒸馏水作为实验工质,上部设有平衡管。内管内流过来自 RTS-40 制冷恒温槽的乙二醇。实验段被置于冰水共存的水槽内,以维持水平环缝外壁温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为了保证冰水混合槽内温度均匀,设置有一充气式搅拌器。内壁温度通过调整制冷恒温槽内乙二醇的温度和流量来控制,其调控范围分别为 $4\sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.086\sim 6.25\times 10^{-3}\text{ kg/s}$ 。实验所用主要测试仪器如表 1 所示,实验装置照片如图 2 所示。

表 1 实验所用主要测试仪器

测量仪器	型号规格	量程	精度
热电偶	铜-康铜	$-40\sim +350\text{ }^{\circ}\text{C}$	0.4%
制冷恒温槽	RTS-40	$-40\sim \pm 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$
电子秤	DLG-10	0.5~5 kg	$\pm 0.01\text{ kg}$
数据采集仪	Agilent34901A	$-100\sim +500\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$



1. 冰水混合槽;2. 套管;3. 实验环形腔;4. 热电偶;5. 制冷恒温箱;6. 潜水泵;7. 电子秤;8. 量杯;9. HP 数据采集仪;10. 充气式搅拌器;11. 工质充入管;12. 平衡管。

图 1 实验系统图

水平环缝内、外壁温度通过 8 支 T 型铜-康铜热电偶测量,流过实验段的乙二醇的温度变化通过 2 支反向连接的 T 型热电偶测量,由于乙二醇的流量很小,因此采用电子秤测量。水平环缝内水的自然对流总换热量 Φ 即为乙二醇流过试验段时的放热量:

$$\Phi = q_m c_p (T_{f,\text{out}} - T_{f,\text{in}}), \quad (1)$$

式中, q_m 为乙二醇质量流量, kg/s ; c_p 为定压比热容, $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{C}$; $T_{f,\text{in}}$ 和 $T_{f,\text{out}}$ 分别为乙二醇的进出口温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

内壁表面传热系数 h 定义为

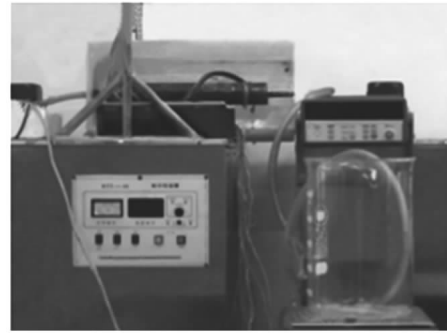


图 2 实验装置图

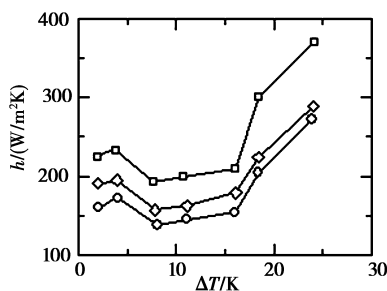
$$h = \frac{\Phi}{A_i (T_h - T_c)}, \quad (2)$$

式中, A_i 为水平环缝内表面积, m^2 ; T_h 和 T_c 分别为水平环缝内、外壁面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

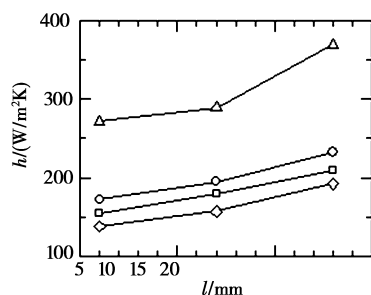
2 实验结果与分析

图 3 给出了不同环缝宽度 $l = (d_o - d_i)/2$ 时内壁平均表面传热系数 h 随温差 ΔT 变化规律的实验结果。由于冷水密度在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时具有最大值,因此,当 ΔT 小于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着 ΔT 的增大,水的密度单调增大,流场内形成的是 1 个单胞,流体在外壁附近上升,在内壁附近下沉,此单胞的强度随温差的增大而增强,因此,内壁平均表面传热系数 h 随 ΔT 的增加而增大;当 ΔT 超过 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,由于水的密度转置点的影响,此时流场内会形成流动方向相反的 2 个流胞,流体在内、外壁附近上升,而在中间下沉,外部的流胞会对内部流胞产生抑制作用,使内壁附近的流动减弱,因此,平均表面传热系数 h 会有所降低;当 ΔT 超过 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以后,外壁附近流胞消失,整个环形液池内完全被内部流胞占据,流体在内壁附近上升,在外壁附近下沉,且流动强度随温差的增大而加强,因此,表面传热系数 h 又增大。上述结论与数值模拟结果^[15]完全一致。

图 4 给出了不同温差 ΔT 下内壁平均表面传热系数随环缝宽度 l 变化规律的实验结果,由图可见,当内壁半径和温差一定时,若环缝宽度较小,则流动较弱,随着环缝宽度的增大,流动会加快,对流的影响加大,因此,平均表面传热系数 h 增加。数值计算结果表明^[15],内壁平均表面传热系数随环缝宽度的增大先减小、后增加,因此,两者有所差异。产生这种现象的主要原因是,在数值计算中,环缝宽度的变化范围较宽,最小宽度约为 2 mm ,在较小的环缝宽度下,流动较弱,对流的影响非常小,导热占主导地位,此时,随着环缝宽度的增大,温度梯度逐渐减小,因此,平均表面传热系数会减小。在实验中,最小环缝宽度为 6 mm ,因此,对流的影响很大,故内壁平均表面传热系数随环缝宽度的增加会单调增大。



注:○: $l=6\text{ mm}$; ◇: $l=12\text{ mm}$; □: $l=8\text{ mm}$
图 3 温差对平均表面传热系数的影响



注:○: $\Delta T=4\text{ }^\circ\text{C}$; ◇: $\Delta T=8\text{ }^\circ\text{C}$;
□: $\Delta T=16\text{ }^\circ\text{C}$; △: $\Delta T=24\text{ }^\circ\text{C}$
图 4 环缝宽度对平均表面传热系数的影响

为了获取内壁表面传热性能的传热关联式,引入 Rayleigh(Ra)数和 Nusselt(Nu)数,其定义分别为

$$Ra = \frac{\rho_m g \beta l^3 (T_h - T_c)^q}{\mu \alpha}, \quad (3)$$

$$Nu = \frac{hd_i \ln(d_o/d_i)}{2\lambda}, \quad (4)$$

式中, ρ_m 为水在转置点温度 T_m 下的最大密度; β 为体积膨胀系数; q 为密度变化指数; μ 为动力粘度; α 为热扩散率; λ 为导热系数。按式(4)定义的 Nu 数表明,如果环缝宽度很小,导热占主导地位时,则 $Nu=1$ 。水的密度随温度变化规律为

$$\rho(T) = \rho_m (1 - \beta |T - T_m|^q), \quad (5)$$

式中, $T_m = 4.029\ 325\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\rho_m = 999.972\text{ kg/m}^3$,
 $\beta = 9.297\ 173 \times 10^{-6}\text{ (K)}^{-q}$, $q = 1.894\ 816$ 。

对实验数据进行线性回归整理,可拟合得到下述传热关联式

$$Nu = 0.190\ 4Ra^{0.250\ 5}, \quad (6)$$

其中,物性参数取 $T_m = 4.029\ 325\text{ }^\circ\text{C}$ 时的值,上式适用范围: $Ra = 1.8 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^6$ 。 Nu 数的拟合值与实验结果的比较如图 5 所示,两者吻合较好,其误差为 $\pm 12\%$ 。

3 结 论

对水平环缝内冷水自然对流换热传热性能进行

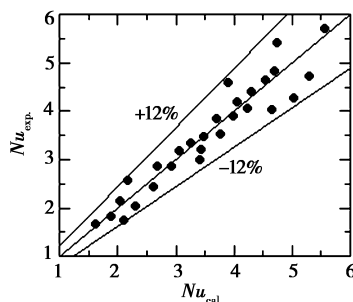


图 5 Nu 数的拟合值与实验值的比较

实验研究,结果表明:1) 在实验范围内,内壁面的平均表面传热系数随环缝宽度的增大而增加;2) 当温差小于 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 或大于 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 时,平均表面传热系数随温差的增大而增大,在 $4\sim 8\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,随温差的增大而减小;3) 采用逐步线性回归方法,得到了内壁面的传热关联式(6)。

参考文献:

- [1] LIN D S, NANSTEEL M W. Natural convection heat transfer in a square enclosure containing water near its density maximum[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 1987, 30(11): 2319-2326.
- [2] TONG W, KOSTER J N. Natural convection of water in a rectangular cavity including density inversion[J]. Int J Heat and Mass Transfer, 1993, 14(4): 366-375.
- [3] ZUBKOV P T, KALABIN E V. Numerical investigation of the natural convection of water in the neighborhood of the density inversion point for Grashof numbers up to 10^6 [J]. Fluid Dynamics, 2001, 36(6): 944-951.
- [4] SONNINO G. Comparison between experimental data and theoretical calculations of free convection in water near its density maximum [J]. Math Comput Modeling, 1997, 25(6): 107-115.
- [5] KENGO S, TAKASHI A. The effect of initial temperature conditions on the steady state of transient natural convection of water near its density maximum in an enclosure [J]. Thermal Engineering, 2000, 10: 627-632.
- [6] SIVASANKARAN S, HO C J. Effect of temperature dependent properties on natural convection of water near its density maximum in enclosures [J]. Numerical Heat transfer Part A - Application, 2008, 53: 507-523.
- [7] NITHYADEVI N, SIVASANKARAN S, KANDASWAMY P. Buoyancy-driven convection of water near its density maximum with time periodic partially active vertical walls [J]. Meccanica, 2007, 42: 503-511.
- [8] KANDASWAMY P, SIVASANKARAN S, NITHYADEVI N. Buoyancy-driven convection of water near its density maximum with periodic active

- vertical walls [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2006, 49:503-511.
- [9] OSORIO A, AVILA R, CERVANTES J. On the natural convection of water near its density inversion in an inclined square cavity [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2004, 47: 4491-4495.
- [10] CAWLEY M F, MCGLYNN D, MOONEY P A. Measurement of the temperature of density maximum of water solutions using a convective flow technique [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 1763-1772.
- [11] CAWLEY M F, MCBRIDE P. Flow visualization of free convection in a vertical cylinder of water in the vicinity of the density maximum [J]. *Int J Heat and Mass Transfer*, 2004, 47: 1175-1186.
- [12] FUNAWATASHI Y, OHTA S, SUZUKI T. Three-dimensional structure of natural convection of water near the density extremum within a horizontal annulus [J]. *Thermal Science&Engineering*, 2004, 12 (4): 29-30.
- [13] 李恒,白博峰,陆军,等. 圆柱腔体内水凝固过程对流实验研究[J]. *工程热物理学报*,2006, 27(6): 977-980.
LI HENG, BAI BO-FENG, LU JUN, et al. Experimental study of thermal convection during the water solidification process in cylinder cavity [J]. *Engineering Thermophysics*, 2006, 27(6): 977-980.
- [14] MING I, GUEY L. Maximum density effects on natural convection of micropolar fluids between horizontal eccentric cylinders [J]. *Int J Engng Sci*, 1998, 36(2):157-169.
- [15] 彭岚,刘渝,李友荣,等. 水平环缝内冷水自然对流换热过程的数值模拟 [J]. *重庆大学学报*,2008, 31(6): 623-626.
PENG LAN, LIU YU, LI YOU-RONG, et al. Numerical simulation on natural convection of water near the maximum density in horizontal annulus [J]. *Chongqing University*, 2008, 31(6): 623-626.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第 1153 页)
- [8] YAN P H, HENG K X, GUO L W. Assessment of insulation condition of generator stator bars based on velocity of ultrasonic waves[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10 (3): 539-547.
- [9] HENG K X, YUE B, HAO Y P. Diagnosis of stator winding insulation of large generator[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 274-277.
- [10] 马小芹,马晓薇,项添春,等. 声技术在大型发电机主绝缘检测中的应用进展[J]. *大电机技术*, 2003(6): 5-9.
MA XIAO-QIN, MA XIAO-WEI, XIANG TIAN-CHUN, et al. Acoustical technology applications in the detection of large generator stator insulation[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2003(6): 5-9.
- [11] WANG B B, YANG Y. On-line measurement of transformer partial discharge[C]// *International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops*. Harbin: IEEE, 2007: 906-909.
- [12] LI J T, RI C L, MIN D, et al. Study of partial discharge localization using ultrasonic in power transformer based on particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008 (15): 492-495.
- [13] LI M, ZHAO H, ZHANG J. Fiber fabry-perot sensors based acoustic detection of partial discharges in power transformers[C]// *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. Gui Lin: IEEE, 2006: 254-257.
- [14] 周力行,李卫国,邓本再. 基于混沌遗传算法的变压器局部放电源点定位新方法[J]. *长沙电力学院学报*, 2004, 19(1): 43-46.
ZHOU LI-XING, LI WEI-GUO, DENG BEN-ZAI. A new method of locating the partial discharge sources in transformer based on chaos genetic algorithm[J]. *Journal of Changsha University of Electric Power*, 2004, 19(1): 43-46.
- [15] SHUANG Z R, XU Y, RUI H Z, et al. Ultrasonic localization of partial discharge in power transformer based on improved genetic algorithm[C]// *International Symposium on Electrical Insulating Materials Yokkaichi*. Japan: IEEE, 2008: 323-325.
- [16] LUO R C, LI W G, LI C R. Partial discharges multi-targets localization in power transformers based on array signal processing[C]// *Tencon 2005 IEEE region 10 conference*. Melbourne, Australia: Ieee, 2005: 1-4.
- (编辑 侯 湘)