

竖管内空气强迫与自然对流换热实验

师晋生

(天津轻工业学院 机械系, 天津 300222)

摘要: 对竖直圆管内空气强迫对流换热与自然对流换热进行了实验, 从量级上表明了两者的不同, 由实验得到了用雷诺数表示的自然对流换热关联式, 与现有大空间自然对流换热公式作了比较。

关键词: 强迫对流; 自然对流; 换热; 量级比较

中图分类号: TK124 文献标识码: A

1 引言

随着下一代核电站安全壳事故后非能动冷却方式的采用, 通道内自然对流换热开始发挥十分重要的作用。在安全壳事故后冷却中, 安全壳相当于一个上下端开口的通道, 其热量的散发形成烟囱效应, 驱使外界空气从下部开口流进此通道, 将壳内热量带走后, 从上部开口流出。在有的设计中, 还在安全壳壁面喷淋水膜以强化传热, 在这种情况下, 自然流动的空气与液膜之间存在热量和质量的传递。在反应堆安全性分析中, 当前对通道内空气自然流动的换热与传质或采用大空间自然对流换热公式^[1], 或采用强迫对流换热公式及其热质比拟式^[2-3], 这在各研究者具体的实验和模型中也许是可行的, 但从广义的角度来看, 通道内的自然对流换热和强迫对流换热是两种不同机理的换热, 简单地相互替代值得商榷。本文通过实验, 对管道内自然与强迫对流换热进行了比较, 对两者的不同作了一些探讨。

2 两种换热特性的量级比较

强迫对流换热依靠外部动力推动流体流过换热表面, 其流量通常较大, 温度梯度也较大, 因而换热效率高。自然对流依靠的是由密度差引起的浮升力, 流量一般较小, 流体内温度梯度也小, 因而其换热效率较低, 但当自然对流换热热流增大, 因而流量也增大, 使其对应的雷诺数可与强迫对流相比拟时, 其换热机理是否就接近甚至等同于后者则值得探讨。为便于比较, 假设在一竖直圆管内分别进行的

强迫对流换热与自然对流换热中, 加热净功率, 流量和流体进口温度都相等, 从理论上说, 这是完全可以做到的, 于是两种情况下的流体出口平均温度也必定相等, 这样两种方式的换热效率就完全取决于壁温和流体温度之差。对层流和紊流, 分别以 u 、 v 表示沿管轴向和径向的流速, x 、 r 为轴向和径向的坐标, g 、 ρ 为重力和空气密度, 两种方式换热的运动方程都可写为

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp}{dx} - \rho g + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau)$$

在管外, 沿高度方向有压力关系

$$\frac{dp_0}{dx} = -\rho_0 g$$

两式相减有

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{dp'}{dx} - \rho g \beta (T - T_0) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau)$$

p' 为管内压力与外界同高度压力之差。以 U 、 β 表示平均流速、热胀系数; L 、 d 、 $\Delta P'$ 表示管长、管径、两端压力与外界压力之差, T_0 、 T_w 分别为环境和管壁的最高温度, τ_w 为管壁摩擦阻力, 则两端的量级关系为

$$\rho U \frac{U}{L} \sim \frac{\Delta P'}{L}, \rho g \beta (T_w - T_0), \frac{\tau_w}{R}$$

可简化为

$$1 \sim \frac{\Delta P'}{\rho U^2}, \frac{g \beta (T_w - T_0) L}{U^2}, \frac{2 \tau_w}{\rho U^2} \frac{L}{d}$$

右端的彻体力项可进一步表为

$$\begin{aligned} \frac{g \beta (T_w - T_0) L}{U^2} &= \frac{g \beta \Delta T d^3}{U^2} \frac{L}{d} / \frac{U^2 d^2}{v^2} \\ &= L / d Gr_d / Re^2 \end{aligned} \quad (1)$$

上式是一个十分有用的判据, 流动属于强迫对流还是自然对流就取决于该彻体力项的大小。对强迫对流, 大雷诺数情况下的浮升力作用相对很小, 该项大大小于 1, 因而忽略自然对流影响。但在实际的强迫对流换热中, 在小雷诺数, 大加热功率情况下, 自然

对流的作用可以变得与强迫对流的作用相比拟,因此在强迫对流实验中,应将彻体力项的量级保持在小于1。在同一个实验中,沿管长向上,壁温升高,彻体力增大,自然对流的作用增强,因此,在强迫对流中限制自然对流的作用,应以管段末端为对象,将此处的温度限制在一个极限之下。对自然对流,流动由浮升力引起,式(1)的量级为1,但当流体流经某处低壁温管段时,局部彻体力较小,流动依靠的是整个管段上彻体力引起的压差,强迫对流发挥着一定作用,但是,在同一个管上所进行的强迫或自然对流换热,只要保证总的格拉晓夫数大于或小于雷诺数的平方,就可保证其在量级上属于自然或强迫对流换热。

按净功率和流量相等的假设,两种换热方式的流体温度相等,物性相同,于是两种换热的壁温与环境温度之差相差一个量级,分别以 T_{w1} 、 T_{w2} 代表自然对流和强迫对流的管壁温度,有

$$(T_{w1} - T_0) \sim 10(T_{w2} - T_0)$$

两种情况下的管内空气平均温度相等,以 T_a 表示,则有

$$(T_{w1} - T_a) \sim 10(T_{w2} - T_a) + 9(T_a - T_0)$$

这表明壁温与管内空气温度之差也应在一个量级之上。因此,从量级上说,竖直管内强迫对流换热的效率应明显高于自然对流换热。只有在某一换热设备中由某处加热产生的自然对流流动经过充分发展之后,经过另一段温度低或彻体力与流动方向垂直如横向表面时,前边产生的浮升力或压差与摩擦力保持平衡,此时,如果管段与流体保持较小的温差,较低的换热强度,则此时的换热才与强迫对流相当。

3 实验步骤

实验管的总长、内径、壁厚分别为 6.9 m、0.08 m、6 mm 的不锈钢直圆管,内壁光滑并经仔细清洗。管外包绝热玻璃棉,厚 50 mm,管两端焊铜法兰作电极,采用低电压大电流直接通电加热,有效加热区长为 6.758 m,管入口和出口处分别设置一副和两副热电偶。为减少出口端冷却较大的影响,将测量空气出口温度的两副热电偶从出口端伸入管内,两副热电偶,一副布置在接近截面中心,另一副靠近管壁,空气出口温度即取此两副热电偶读数的平均值,管壁温度的测量也到此处为止。在管周外壁沿长度方向 15 个位置上焊有 33 副热电偶测定外壁温度,因空气换热效率低,管壁导热热阻相对很小,即将此温度当

作内壁温度,靠入口端和出口端 6 个截面上热电偶间距较小,每个位置布置一副,中间的 9 个截面间距较大,每个位置布置三副以作比较。实验中,三副热电偶测量值相互差别最大不超过 0.1%。所用热电偶为经过标定的铜康铜热电偶。加热电功率由调压器调节,电压和电流由一多功能数字电压表测量。因管段较长,壁温变化对电阻的影响也较大,故局部热流用测得的电流与局部电阻求得,局部电阻由局部温度和实验管的电阻温度特性得到。实验开始前,将管两端用绝热棉封堵进行热损失标定,管壁传递给空气的净热量即为电功率减去损失的热量。因管段较长,空气的换热强度也较低,因而散热损失较大,大多数工况约为 20%。

进行强迫对流实验时,管下端联一风机提供风量,流量用一孔板流量计测量。出口端直接通向外界环境,电功率范围为 301.7 ~ 1 637.8 W,空气进口温度 24.3 °C ~ 37.12 °C,出口温度 49.6 °C ~ 188.5 °C,流量 $0.173 e^{-5} \sim 0.516 e^{-5}$ kg/s。自然对流时,上下端都开口,流量由热平衡即净加热功率和空气的进出口温差得到,电功率范围为 66.4 ~ 1 427 W,空气进口温度 13.1 °C ~ 16.2 °C,出口温度介于 22.8 °C ~ 130.1 °C。由实验得到了努谢尔特数,雷诺数。换热系数 $\alpha_x = q_{wx} / (T_{wx} - T_{ax})$, $q_{wx} = Q_x / A$, Q_x 为电功率减去由热损失标定得到的向环境的局部散失热量, T_{wx} 为测得的当地壁温, T_{ax} 为管内当地空气温度,由入口空气温度加上沿程受热产生的温升而得, A 为管内壁表面积,此处即为 1.698 m²。雷诺数 $Re = ud/\nu$, u 为平均流速, ν 为空气粘度,换热系数得到后,可得 $Nu = \alpha d / \lambda$, λ 为空气导热系数, ν 与 λ 按空气在各处的温度取值。在考虑充分发展的换热特性时,为减少管进口发展段和末端热损失较大的影响,只取管段中间换热性能比较稳定的实验点进行分析。

4 实验结果与讨论

表1、表2分别列出了强迫与自然对流实验中由测定电压,电流得到的总电阻和由管壁温度与其电阻的温度特性得到的总电阻及由此两种方法得到的总热流。由此两种方法校核壁温测量的准确性。由表可知,两种方法,强迫对流相差最大 4.71%,自然对流最大 2.55%。在强迫对流实验中,空气出口温度由测量得到后,再与由热平衡得到的温度值相比较,多数工况两者的偏差在 1.03% ~ 3.69%,个别工况达

到 5.75% ~ 16.8%, 误差大的工况主要是由电功率波动引起, 由此表明电功率、流量和温度的测量基本可靠, 因而自然对流的流量可由热平衡得到。

表 1 强迫对流实验管件的电阻和加热功率

R/Ω	R''/Ω	dR/R	Q/W	Q''/W	dQ/Q
.3908E-02	.3724E-02	.0471	316.59	301.70	.0471
.3874E-02	.3735E-02	.0358	322.67	311.12	.0358
.4100E-02	.4067E-02	.0079	823.62	817.09	.0079
.3997E-02	.3953E-02	.0110	866.04	856.52	.0110
.4103E-02	.3977E-02	.0308	920.92	892.54	.0308
.4024E-02	.3980E-02	.0110	886.48	876.76	.0110
.4297E-02	.4325E-02	-.0065	1532.45	1542.49	-.0065
.4120E-02	.4114E-02	.0015	1353.76	1351.68	.0015
.4211E-02	.4207E-02	.0008	1259.41	1258.41	.0008
.4001E-02	.3978E-02	.0057	1152.30	1145.76	.0057
.4050E-02	.4050E-02	.0000	1227.86	1227.88	.0000
.4075E-02	.4049E-02	.0065	1096.35	1089.27	.0065
.3938E-02	.3934E-02	.0009	546.06	545.57	.0009
.3914E-02	.3921E-02	-.0016	542.81	543.70	-.0016
.3984E-02	.3908E-02	.0192	548.58	538.05	.0192
.3903E-02	.3826E-02	.0197	545.17	534.43	.0197
.3918E-02	.3848E-02	.0180	516.52	507.24	.0180
.3901E-02	.3849E-02	.0134	482.79	476.32	.0134
.4145E-02	.4032E-02	.0273	1483.37	1442.94	.0273
.4148E-02	.4149E-02	-.0002	1637.61	1637.89	-.0002
.4155E-02	.4156E-02	-.0002	819.88	820.03	-.0002
.4152E-02	.4154E-02	-.0005	724.19	724.57	-.0005
.4264E-02	.4292E-02	-.0066	1367.76	1376.77	-.0066
.4169E-02	.4223E-02	-.0129	1472.81	1491.89	-.0129
.4305E-02	.4372E-02	-.0156	1379.46	1400.97	-.0156

表 2 自然对流实验管件的电阻和加热功率

R/Ω	R''/Ω	dR/R
.3899E-02	.3901E-02	.0006
309.96	310.16	.0006
.4256E-02	.4337E-02	.0192
1400.35	1427.19	.0192
.4443E-02	.4555E-02	.0252
2045.84	2097.45	.0252
.4010E-02	.4028E-02	.0044
556.18	558.60	.0044
.4101E-02	.4162E-02	.0147
900.47	913.69	.0147
.3969E-02	.4001E-02	.0080
493.03	496.95	.0080
.4218E-02	.4325E-02	.0255
1266.41	1298.67	.0255
.4262E-02	.4334E-02	.0169
1361.85	1384.86	.0169

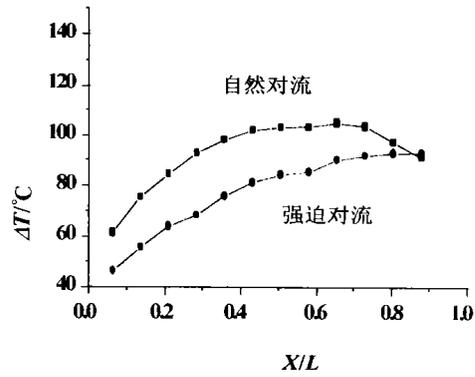


图 1 相同工况强迫与自然对流的温差

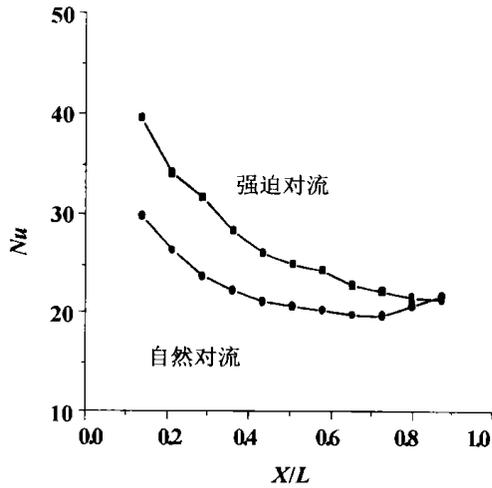


图 2 相同工况强迫与自然对流的换热特性

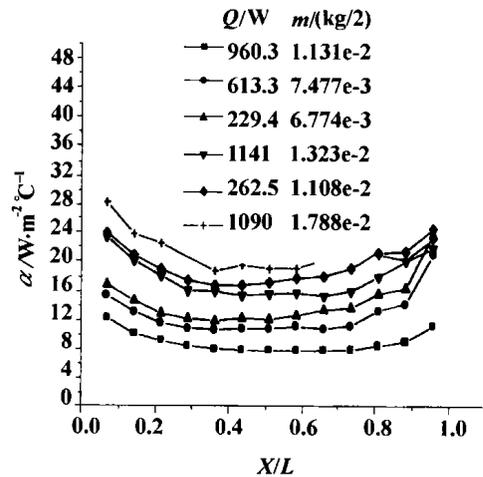


图 3 强迫对流的换热系数

理论上说可将两者的流量和进出口温差调成一样, 从而可以十分直观地对两者进行比较。但实际上, 因自然对流流量不能直接确定, 只能测定其加热功率和进出口温差, 在做强迫对流实验时要将加热功率和进出口温差调成与自然对流一样是十分困难的。因此, 本文对自然与强迫对流换热实验的比较, 是在加热功率和空气进出口温差在相近的范围内进行的, 主要是考察两者在相同的

工况范围内的变化趋势, 除此, 还对两种换热方式进行了一个工况尽可能接近的比较。强迫与自然对

将强迫对流换热与自然对流换热进行比较, 从

流的热流分别为 1 376.77 W、1 389.44 W，进出口温差分别为 140.56 °C 和 135 °C，这样的接近程度已十分困难。两者流量，雷诺数近似看作相等。管壁和空气的温差及努谢尔特数在管长上的分布示于图 1、图 2。自然对流的温差高于强迫对流，沿管长的增长开始时较快，然后变得平缓，这反映自然对流要依靠温差驱动流体流动和将热量传递给流体，因而温差上升较快。接近末端，流动得到了较充分发展，因而温差增长减慢，而强迫对流靠外部动力驱使流体流动，温差的作用只是传递热量，因而增长较慢而均匀，在末端，因散热增强两者都下降。

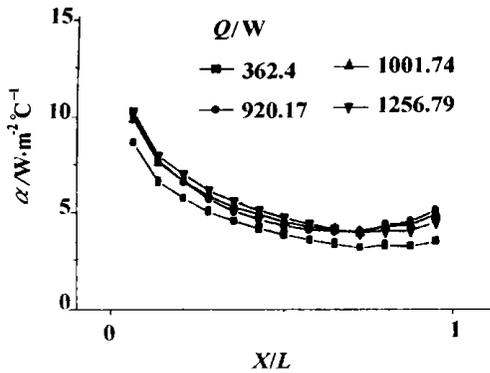


图 4 自然对流的换热系数

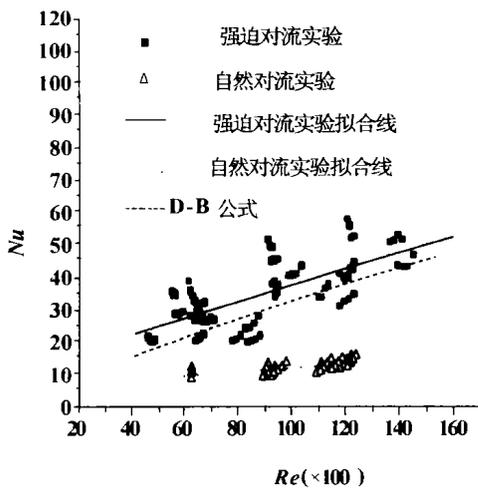


图 5 两种换热特性的比较

略有上升，加热功率增大时，相应的曲线上移。对相同的加热功率，即使强迫对流的流量实际上略小于自然对流，自然对流的壁温与空气温度的差都大于

强迫对流，因而强迫对流的换热系数仍大于自然对流。

将强迫与自然对流换热的实验结果以 $Nu \sim Re$ 的形式绘于图 5，与广泛使用的紊流强迫对流换热公式 $Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$ 进行比较，由图可知强迫对流的实验结果有大于此式，也有小于此式，而多数较此式大，拟合式比该式大 12.8% ~ 35.2%，这一差别是由于进口段及散热损失较大引起。在图上，自然对流的换热特性低于强迫对流，实验点都在强迫对流之下，随 Re 增大的趋势也较平缓，其拟合式为

$$Nu = 0.3319 Re^{0.392} \quad (2)$$

文献中采用大空间竖直平板的自然对流换热公式^[2]，本文将实验结果换算成相应的形式，等壁温与等热流^[4]的换热公式分别为

$$Nu = 0.13(Gr Pr)^{1/3}; Nu = 0.17(Gr \cdot Pr)^{1/4}$$

可知实验结果低于等壁温，高于等热流，差别显著，这种差异是很显然的，这是因为管道内自然对流机理与管道外自然对流机理不同，将本文自然对流实验结果表示成 $Nu \sim Gr$ 的形式，拟合式为

$$Nu = 0.45856Gr^{0.19266} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可知，管内空气自然对流换热效率随雷诺数或格拉晓夫数而增大的趋势都较小，反映了自然对流的特点。此两式可用来对后继的辅以下降液膜时的空气自然流动的传热提供参考。

参考文献:

[1] KENNEDY M D, WOODCOCK J, WRIGHT R F, *et al.* Westinghouse-gothic comparisons with passive containment cooling tests using a one-to-ten scale test facility [J]. *Nuclear Technology*, 1996, 113: 14-20.

[2] AMBROSINI W, MANFREDINI A, MARIOTTI F, *et al.* Heat transfer from a plate cooled by a water film with countercurrent air flow [J]. *Nuclear Technology*, 1995, 112: 227-236.

[3] KANG Y M, PARK G C. An experimental study on evaporative heat transfer coefficient and applications for passive cooling of AP600 steel containment [A]. *Ninth International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics* [C]. California: San Francisco, 1999.

[4] 杨世铭. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.

(何静芳 编辑)

Ying, NIU Zhong-yi, ZHANG Zheng-yi, et al (Power Engineering Department, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 37 ~ 40

A combined diesel or gas turbine (CODOG) power plant underwent a technical modification. On this basis studied under various loads was the effect of different damping values, various switch-over speed differences and other factors of a SSS clutch on the dynamic characteristics of the the CODOG power plant during the switch-over process. As a result, obtained were the SSS clutch displacement curves and some meaningful conclusions. **Key words:** combined diesel or gas turbine power plants, synchronous-self-shifting clutch, displacement curve

生物质复合型煤固硫特性研究 = A Study of the Sulfur Retention Characteristics of Biomass Compound Type of Coal [刊, 汉] / HE Fang, WANG Hua, BAO Gui-rong, et al (Institute of New Technology on Environment-harmonious Energy Source under the Kunming University of Science & Technology, Kunming, Yunnan Province, China, Post Code: 650093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 40 ~ 42, 50

On the basis of analyzing the sulfur retention mechanism of the biomass compound type of coal developed by the authors an experimental study was conducted of the sulfur retention characteristics of this type of coal. The results of the study indicate that the coal under discussion enjoys a higher sulfur retention ratio than that of conventional types of coal. When Ca/S is equal to 2 and the combustion temperature lower than 900 °C the sulfur retention ratio of the biomass compound type of coal can reach in excess of 90%. This retention ratio is subject to various factors, such as combustion temperature, the amount of biomass added, Ca/S ratio, etc. Some additives, such as Fe₂O₃ can significantly enhance the sulfur retention capability. **Key words:** biomass compound coal, sulfur retention mechanism, sulfur retention characteristics

竖管内空气强迫与自然对流换热实验 = An Experiment on the Forced and Natural Convection Heat Exchange of Air in a Vertical Tube [刊, 汉] / SHI Jin-sheng (Mechanical Department, Tianjin Light Industry Institute, Tianjin, China, Post Code: 300222) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 43 ~ 46

An experiment was conducted of the forced and natural convection heat exchange of air in a vertical round tube. The difference between the above two types of heat exchange is shown from the aspect of the order of magnitude. Through the experiment obtained was a natural convection heat exchange expressed by Reynolds number, which is compared with the natural convection heat exchange of the existing large air space. **Key words:** forced convection, natural convection, heat exchange, comparison of the order of magnitude

强润湿性液体池沸腾传热的实验研究和机理分析 = Experimental Study and Mechanism Analysis of Pool Boiling Heat Transfer of Highly Wetted Liquid [刊, 汉] / ZHOU Ding-wei, MA Chong-fang (College of Environmental and Energy Engineering under the Beijing Polytechnic University, Beijing, China, Post Code: 100022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(1). — 47 ~ 50

With respect to the test of pool boiling heat transfer of highly wetted liquid a set of effective test procedures was proposed and an experimental study conducted of R113 pool boiling heat transfer in strict accordance with the test procedures. The study focuses on the effect of surface aging and liquid subcooling on the pool boiling heat transfer curves and incipient boiling point. Three abnormal phenomena have been observed during the test. In conclusion, from the perspective of the boiling heat transfer mechanism of highly wetted liquid a relevant explanation was given concerning the above-cited phenomenon. **Key words:** pool boiling, heat transfer, hysteresis

流化床锅炉预测指导系统研究 = A Study of the Predictive Instruction System of a Fluidized Bed Boiler [刊,