

粗糙套管内流体的流动与放热*

颜迪民 许国华 陈忠民 胡克杰

提 要

本文对粗糙套管内水的放热及摩阻进行了试验研究,提出了相应的经验公式。试验表明,放热系数可增加一倍多。此外根据湍流理论还发展了半理论的计算方法,后者能很好地整理大量的粗糙套管的试验数据。

前 言

远在 1941 年, Cope^[1] 就对带有内螺纹的圆管作了水的放热试验研究, 指出增加表面粗糙度、提高壁区湍流度可以改善热交换能力。最近十几年, 由于热能动力事业的发展, 粗糙表面的传热研究工作愈来愈受到人们的重视。

强化传热是提高热能动力设备比功率, 降低其基本建设投资的有效办法。所谓强化传热就是在加热表面上加工出周期性的横向肋条与沟槽以及其他类型的粗糙度, 以破坏流动边界层, 形成脱离区或其他旋涡流动结构。所以粗糙管内流体的流动情况与放热规律是极为复杂的, 它与一系列因素有关, 比如肋的高度、间距, 甚至形状。Gomelanvi^[2] 整理了许多试验数据, 得出在肋距 $p/e = 10-14$ 时, 放热系数最高。在本试验中, 为了简化试验工作量, p/e 固定不变, 取 $p/e = 12$, 仅改变肋的高度。此外, 除单面粗糙外还进行了双面粗糙试验。

试 验 方 法

试验用的是带直角螺纹的黄铜粗糙管。它是在车床上加工成的。其中内管的直角螺纹加工在内管的外表面, 外管的直角螺纹加

表 1 肋条几何尺寸

	e	p/e	b
内 管	0.05	12	0.05
	0.10	12	0.10
	0.14	12	0.14
	0.20	12	0.20
外 管	0.10	12	0.10
	0.14	12	0.14

注: e ——肋高, b ——肋宽, p ——肋距

工在外管的内壁上。螺纹尺寸见表 1。试验元件(包括内、外套管)在试验本体(见图 1)内用定位环定位, 形成外径 $\phi 39$ 、内径 $\phi 35$ 的环形通道。试验回路如图 2 所示, 可在 20 大气压以下运行。由不锈钢泵(1)维持回路内的水循环, 水从离心泵出来, 经过辅助加热器(2)从上向下流经试验本体(3), 然后经过流量孔板(4)回到水泵。整个回路用氮气充压, 用容积补偿器保证整个回路压力稳定。回路的流量用旁路调节阀(8)和泵出口调节阀(7)调节。通过调节冷却器(5)的冷却水量及辅助加热器的功率来调节水温。为了保证得到稳定的冷却, 冷却水是由高位稳压水箱提供的。

试验元件的加热电流由二台直流电机供

* 1974 年 12 月 20 日收到。

给,每台最大输出电压 20 伏,最大电流 10000 安。在双面加热时内、外管串联。在试验过

程中,借助机组励磁回路内的手动滑线变阻器来改变励磁电流,以便连续调节试验元件的功率。

在内套管 $l/de = 92$ 处安装了六副镍铬-镍铝热电偶,用来测量此截面的周向温度分布。为此,专门设计了一套测温装置,用 $\phi 0.2$ 的热偶作测温元件,靠拉杆、弹簧片来保证放置热偶结点的聚四氟乙烯块能够很好地紧贴壁面。为了防止造成附加电势,热偶结点不与壁面直接接触。

在外套管还开了二个测压小孔,相距为 175 毫米。小孔直径为 0.5 毫米,用 $\phi 1 \times 0.25$ 的不锈钢管将压力取出,引至差压计,以测量二者之间的压差。

试验结果与讨论

我们首先用光滑管作了试验。单面加热时的放热系数与 McAdam 公式一致,双面加热时的数据比 McAdam 公式高 13%,这与我们以前的试验结果是吻合的。阻力系数比光滑圆管 (Blasius 公式) 高 6%,这与大量的试验数据也是一致的。接着做了粗糙管试验。在试验中热功率与电功率之间的不平衡一般小于 $\pm 10\%$ 。

放热系数按下式计算

$$\alpha_x = \frac{q_F}{\bar{t}_{ux} - t_{fx}} \text{ 大卡/米}^2 \cdot \text{时} \cdot ^\circ\text{C} \quad (1)$$

其中,热负荷按电功率计算,释热面积一律按相应的光滑表面积计算。在计算水温 t_{fx} 时,认为水温沿元件长度是直线分布。这是因为元件壁厚比较均匀,同时试验段进出口水温引起比热 C_p 的变化极小。

内套管的外壁温按下式计算:

$$\bar{t}_{ux} = \bar{t}_{ox} - \Delta t_{ux} \quad (2)$$

这里 $\bar{t}_{ox}$ 是内套管内壁温的测量平均值,而 Δt_{ux} 为壁温降,可根据热传导方程确定:

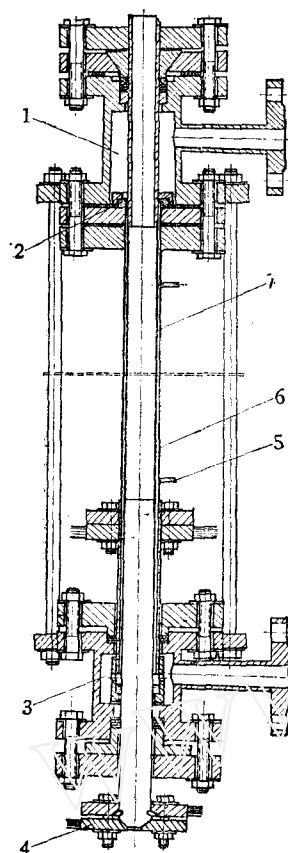


图1 试验段本体图

1. 进水室, 2. 定位环, 3. 出水室, 4. 导电铜排, 5. 测压管, 6. 外套管, 7. 内套管

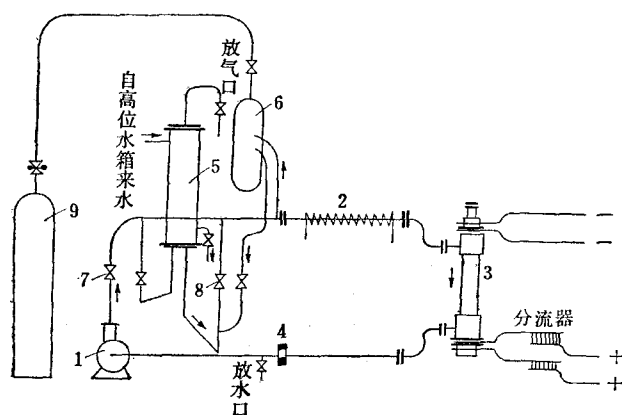


图2 试验回路图

1. 循环水泵, 2. 电阻丝加热器, 3. 试验段, 4. 流量孔板, 5. 冷却器, 6. 容积补偿器, 7. 调节阀, 8. 调节阀, 9. 氮气瓶

$$\Delta t_{ux} = \frac{q_F D_2}{4\lambda} \left[1 - \frac{2 \ln \frac{D_2}{D_1}}{\left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 - 1} \right] \quad (3)$$

在试验中,测温点至水进口处距离为 $92de$, 故放热系数已经达到稳定。放热系数按下列准则关系式整理:

$$Nu_f = C_1 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (4)$$

在公式中,定性温度取的是对应截面上的水温,定性尺寸取的是光滑通道的水力当量直径。

图3和图4表示了全部放热试验结果。

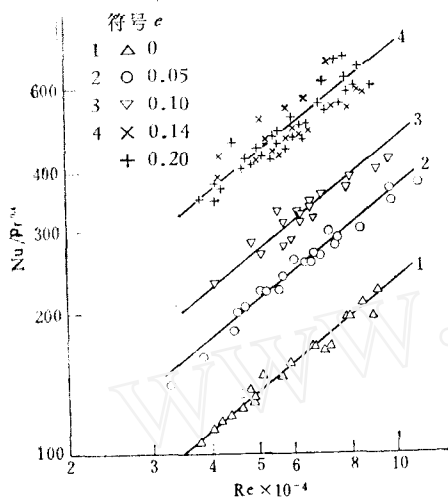


图3 内管带肋、外管光滑、内管加热时的放热系数
注: $e = 0.14, 0.20$ 的数据在图上已乘 1.5

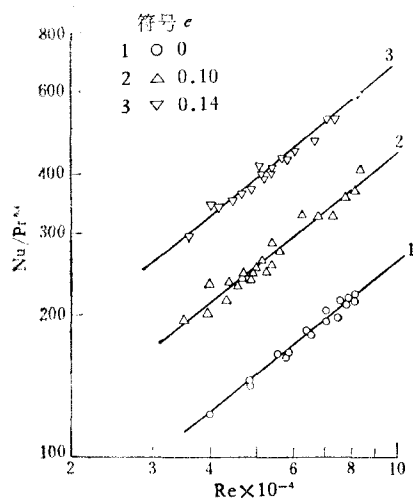


图4 双面带肋、双面加热时的内壁放热系数

关于水力阻力,我们首先进行等温摩阻测量,然后在元件通电发热情况下进行摩阻测量。实验结果按一般阻力系数公式

$$\xi = \frac{\Delta P}{\frac{l}{de} \frac{u^2}{2g} \gamma} \quad (5)$$

整理,这里, l 为两测压孔之间的距离; γ 为测压孔之间水的平均比重; u 为流速; 而

$$\Delta P = \Delta H (\gamma_{Hg} - \gamma_w) \quad (6)$$

其中, ΔH 为测得的压差, γ_{Hg} , γ_w 为室温下汞和水的比重

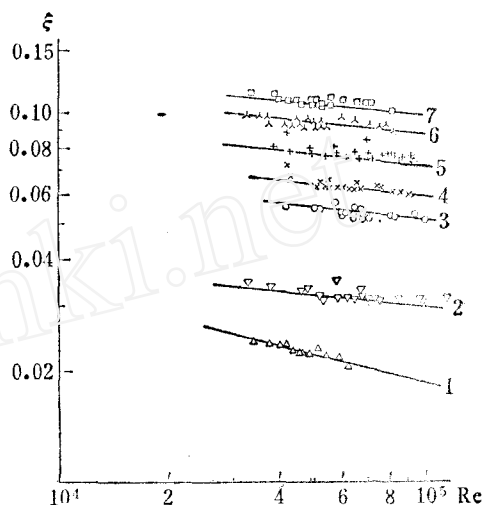


图5 粗糙套管的摩阻系数

(图中符号: 光管 Δ ; 单面粗糙 e : $\nabla 0.05$, $\circ 0.10$, $\times 0.14$, $+ 0.20$; 双面粗糙 e : $\lambda 0.10$, $\square 0.14$)

由图5可见,粗糙管的阻力系数可表达为

$$\xi = C_2 Re^{-0.1} \quad (7)$$

试验表明,在试验条件下热负荷对摩阻没有明显的影响,因此为了节省篇幅图上仅表示加热时的数据。

在表2上总结了全部实验结果。由表2可见,采用强化肋后放热系数有了成倍的增长。但在 $e > 0.1$ 毫米或 $l/de > 0.025$ 时,放热系数就增加不大了。这是由于此时肋高已大于流体的粘性底层了,再加大肋高对粘性底层的扰动就影响不大,但是流动阻力还将继续增加。强化肋的工作效能通常用泵在等功率下放热系数的提高来表示。由式(4),

表 2 放热与水力摩阻试验结果比较

		e	p/e	C_1	$\alpha/\alpha_{\text{单光}}$	$\alpha/\alpha_{\text{双光}}$	ξ	$\xi/\xi_{\text{光}}$
内管单面加热	光滑管	0	0	0.023	1		$0.335/\text{Re}^{0.25}$	1
	粗糙管	0.05	12	0.036	1.57		$0.0948/\text{Re}^{0.1}$	1.46
	„	0.10	12	0.046	2.00		$0.164/\text{Re}^{0.1}$	2.50
	„	0.14	12	0.049	2.13		$0.188/\text{Re}^{0.1}$	2.85
	„	0.20	12	0.049	2.13		$0.228/\text{Re}^{0.1}$	3.44
双面加热	光滑管	0	0	0.026		1	$0.335/\text{Re}^{0.25}$	1
	粗糙管	0.10	12	0.044		1.69	$0.278/\text{Re}^{0.1}$	4.22
	„	0.14	12	0.067		2.58	$0.314/\text{Re}^{0.1}$	4.73

注: 在表 2 中, α 指内壁放热系数 (无论是单面加热, 还是双面加热); $\xi_{\text{光}}$ 指内、外管无肋时的阻力系数; $\xi/\xi_{\text{光}}$ 是在 $\text{Re} = 5 \times 10^4$ 时的数值。

(7) 不难获得泵等功率下粗糙管与光滑管放热系数之比

$$\left(\frac{\alpha_r}{\alpha_s}\right)_p = \left(\frac{C_1}{0.023}\right) \left(\frac{0.335}{C_2}\right)^{0.276} \text{Re}_r^{-0.041} \quad (8)$$

图 6 表示了 $\text{Re} = 4 \times 10^4$ 及 10^5 时的计算值。可见当 $e = 0.14$ 毫米时放热系数提高最多, 约 60% 左右。在计算中, 泵的功率仅考虑了换热面的摩阻。实际上, 由于流速的降低, 回路里和设备内没有热交换的部分的摩阻也有很大下降。因此当 $\alpha_r/\alpha_s = 1$, 甚至小于 1 时, 有时也是有益的。

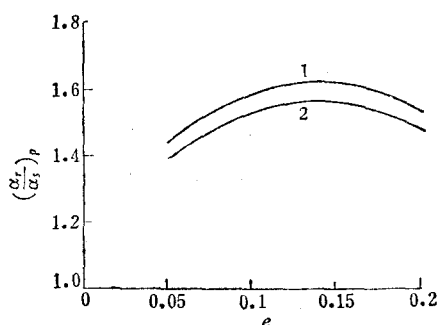


图 6 泵功率不变时放热系数的提高
(Re : 1— 4×10^4 ; 2— 10^5)

双面带肋的试验做了二种, 而且还只测了内管的放热系数。这是由于外管肋条加工质量过差的缘故, 因此试验数据只是定性的。

试验数据的整理与分析

前面已经提到, 粗糙管的放热与肋的形状及尺寸等一系列因素有关, 所以提供一个方法来整理有关的数据, 对于简化试验工作量和方便设计者的使用甚为重要。目前半理论的综合方法取得了一定的成功。Dipprey 和 Sabersky^[3] 把壁区相似规律运用于温度场和速度场的分析, 得到了热量-动量相似关系式:

$$(f/2st - 1)\sqrt{f/2} + 8.48 = g(e^+, \text{Pr}) \quad (9)$$

后者很好地整理了砂型粗糙管的放热数据。Webb^[4] 等人发展了他们的理论, 运用于重复肋粗糙管。至于粗糙套管, 目前还没有类似的尝试。

套管元件的热边界条件常常是复合的, 而且由于考虑到加工上的方便与经济上的合理性, 又常常是仅仅内管表面粗糙, 内管单面加热。因此必须首先将复合边界条件的数据转化成单一边界条件, 即均匀粗糙及均匀加热的情况。Hall^[5] 转换取得一定的成功, 它的基本假定有二个:

1. 在切应力等于零的周界以内的湍流结构不受周界以外结构变化的影响;
2. 切应力等于零的表面同最大速度表面一致。根据这个假定我们把环形通道分成二

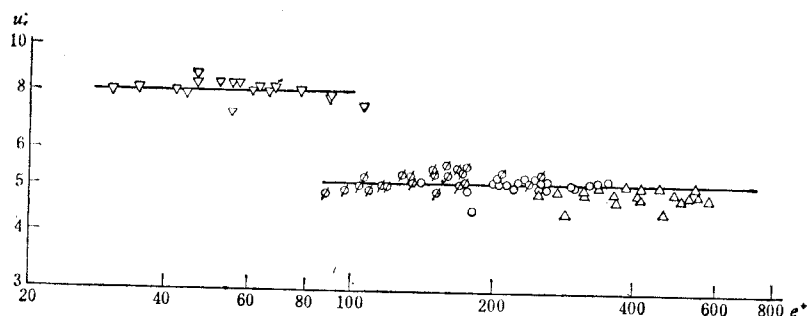


图7 u_e^+ 与 e^+ 的关系
 $l/de \nabla 0.0125, \phi 0.025, \circ 0.035, \Delta 0.05$

个独立的区域,以最大速度半径 r_m 为分界面.利用动量守恒定律,最大速度半径为

$$R_m = \sqrt{1 - \left(\frac{f}{K} \text{Re}^n\right)^{-1/(1+n)} (1 - R_1)} \quad (10)$$

式中 n, K 一般取为 0.2 及 0.046. 这里 R 为无因次半径 r/r_2 .

根据 Nikuradse^[4] 粗糙管内的速度分布可以写作

$$u^+ = 2.5 \ln(y/e) + u_e^+ \quad (11)$$

对于砂粒状粗糙管,他进行了广泛的试验,证明上式是正确的,而且 u_e^+ 是一个常数.我们根据粗糙管阻力数据进行了计算,其结果表示在图 7 上.这里 u_e^+ 不仅与 e^+ 无关,而且也与肋的高度无关.唯一例外是 $e = 0.05$ 毫米的数据,这可能是肋的宽度没有达到设计值的缘故.在我们的试验中由于 p/e 固定为 12,所以 u_e^+ 与 p/e 的关系无法确定.为此我们整理了其他有关的试验数据.由图 8 可见, u_e^+ 不仅与 p/e 有关,而且与肋的形状有关.

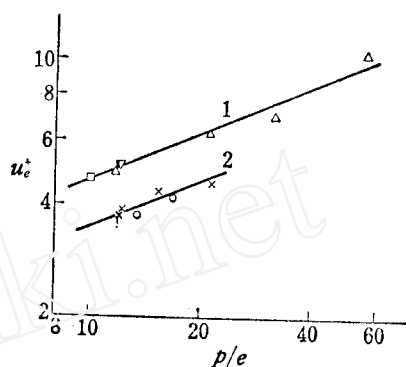


图8 u_e^+ 与 p/e 的关系
数据来源: Δ [8], ∇ 本文, $\square$ [6],
 $\times$ 顾维藻, $\circ$ [7]

对于 $p/e \geq 10$, 有

$$u_e^+ = a \left(\frac{p}{e}\right)^{0.43} \quad (12)$$

这里

$$a \begin{cases} 1.73 & \text{正方形, 圆形} \\ 1.29 & \text{矩形 } b/e = 1.2 \end{cases}$$

在分析粗糙表面的传热时,同文献[3,4]

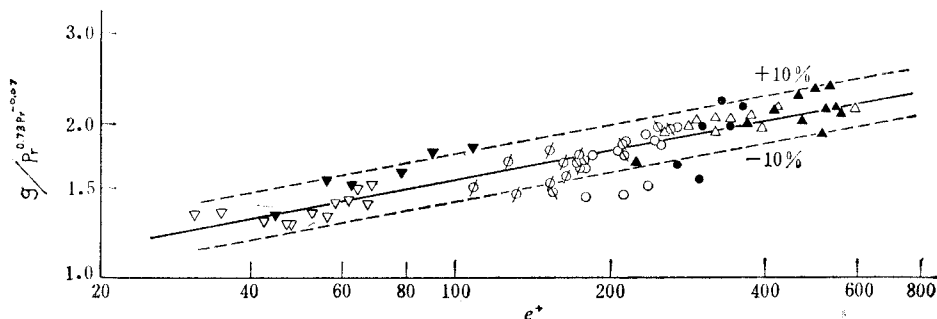


图9 g 的关系式
工质: 水, $p/e = 12, l/de \nabla \nabla 0.0125 \phi \phi 0.025 \circ \bullet 0.035 \Delta \blacktriangle 0.05$ Pr 数相应为 3.3 与 2.2

类似,把传热阻力分成二部分;即壁区,包括肋的尖端及中央区,那里适用雷诺相似。运

用热量-动量交换方程,并作了一些简化^[4],不难得到套管中粗糙内管的放热系数

$$St_{\text{管}} = \frac{f/2 \cdot \phi}{1 + \sqrt{f/2} [6.45(e^+)^{0.19} Pr^{0.73} Pr^{-0.07} - a(p/e)^{0.43}]} \quad (13)$$

其中 ϕ 为考虑内、外壁热负荷比值的影响,对于本文粗糙试验 $\phi=1$

传热试验数据按式(13)整理。通过分析,得知 g 与 Pr , e^+ 有关,但与 p/e 及肋的形状无关。 Pr 的影响可用 $Pr^{0.73} Pr^{-0.07}$ 考虑。在图9上表示了 g 与 Pr , e^+ 的关系

$$g = 6.45(e^+)^{0.19} Pr^{0.73} Pr^{-0.07} \quad (14)$$

可见分散度一般不超过 $\pm 10\%$ 。其他作者的数据包括文献[6—8]和顾维藻的,也能用式(14)表达,除个别情况外分散度也不超过 $\pm 10\%$ 。

参 考 文 献

- [1] Cope, W. F., *The Institution of Mechanical Engineers J. & Proc.*, 145 (May, 1941).
- [2] Gomelav, V., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 7, 6 (1964).
- [3] Dipprey, D. F., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 6 (1963), 329.
- [4] Webb, R. L., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 14, 4 (1971).
- [5] Hall, W. B., *J. Mech. Engng. Sci.*, 4 (1962), 287.
- [6] Sherift, N., et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 9 (1966), 1297.
- [7] Федынский, О. С., Сб. «Вопросы теплообмена».
- [8] Draycott, A. & Lawther, K. R., *Int. Develop. in Heat Transfer, Part III* (1961).

全国地质力学经验交流会在大连召开

经国家地质总局批准,地质科学研究所于1975年10月11—25日在大连召开了全国地质力学经验交流会。出席这次会议的有各省、市、自治区地质局及有关地质队、大专院校和科研单位、石油化工、冶金、煤炭、水电、二机部、中国科学院、国家地震局以及有关编辑、出版部门共一百八十九个单位,三百七十八人。

旅大市委和国家地质总局负责同志对大会做了指示。

这是一次贯彻“独立自主、自力更生”精神,迅速发展我国自己的科学事业的盛会。会议贯彻落实毛主席的~~重要~~重要指示,总结了运用地质力学理论和方法的经验;讨论了地质力学长远发展规划和协调分工。

代表们回顾地质力学的发展过程,畅谈无产阶级文化大革命以来地质科技战线的大好形势。地质力学是我国卓越科学家李四光同志在总结群众实践经验的基础上创立的,它土生土长,具有中国自己的特色。在党的关怀下,特别是无产阶级文化大革命以来,地质力学在广泛的领域中,如区域地质调查,找

矿勘探,水文、工程地质,煤田,地震,地热等方面,都显示了作用,在为祖国找寻石油、钨矿、金刚石、铀矿等方面,做出了重要贡献。

通过会议,交流了地质力学经验。在根据构造体系的各种构造形迹组合规律,如构造等距性、构造发展阶段性等对煤田、油田、铁铜矿床进行预测和为工农业找水方面取得显著成效;对构造运动和沉积建造、岩浆活动、变质作用等其它物质运动关系的综合研究也有了进展;而区域构造应力场的探索、结构面力学性质和古构造等研究工作,近年来为许多地质工作者所注意,得到了一些新的启示。代表们普遍注意到今后必须加强地质科学和其它科学的相互渗透,特别是要充分运用现代力学的成就,深入揭示地壳运动的规律与本质,将地质力学的基本理论研究往高里提。

代表们一致表示要奋发图强,在毛主席革命路线指引下,地质力学工作一定能够加快步伐,为巩固无产阶级专政,为全面实现农业、工业、国防和科学技术的现代化而发挥更大的战斗作用。