

[4] В. И. Райко, *Kernenergie*, 10, 85 (1967).
 [5] J. Koch, *Electromagnetic Isotop Separators and Applications of Electromagnetically Enriched Isotop*, Amsterdam, 1958, p. 297.
 [6] T. S. Green, 2nd Intern. Ion Source Conf., Vienna, 1972, p. 559.
 [7] E. D. Shipley et al., USA Pat., 3, 260, 844.

(编辑部收到日期: 1980年7月21日)

狭窄环管流道摩阻系数的测定

田吉安 周炳泉 洪忠元 居世孝 沈庆平

(上海原子核研究所)

一、引言

流体流过环管流道内的阻力规律,早已有不少人进行过试验研究,如戴维斯^[1](Davis),罗斯福^[2](Rothfus)等人,努森(Knudsen)和卡茨^[3](Katz),斯坦^[4](Stein)等都曾给出过环管(包括偏心环管)流道内摩阻系数和雷诺数的关系曲线。

现代,由于核反应堆的出现和发展,要求对流体流过狭窄环管流道(一般 $d_e \leq 3$ 毫米, $D/d \leq 1.30$)的阻力规律进行试验研究。迪安^[5](Dean)曾进行过水流过狭窄环管流道内摩阻系数的测定。因为目前这方面的试验资料尚少,所以有必要开展这一方面的试验研究。

二、试验装置

我们在一个以水塔做为水源的开式水力试验回路上,进行狭窄环管流道($d_e = 2, 2.05$ 毫米, $D/d = 1.20, 1.205$)的阻力试验,试验回路的流程如图1所示。

试验段中,环管流道的外管选用了一根控制棒导向管,是不锈钢管材。根据试验需要

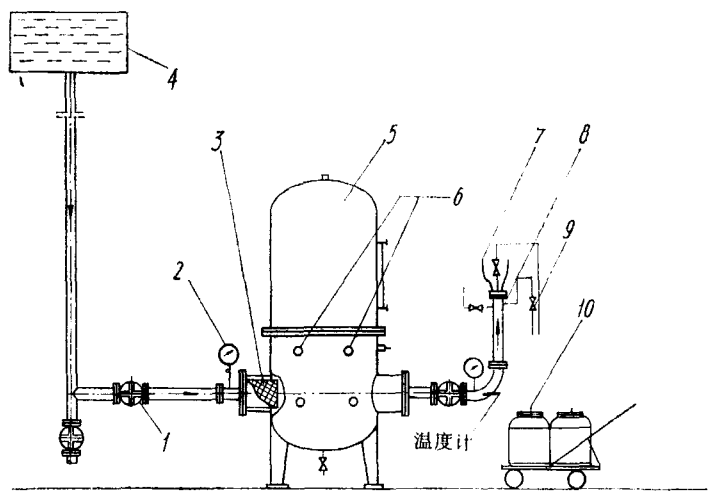


图1 试验回路流程图

1—阀门; 2—压力表; 3—过滤器; 4—水塔; 5—稳压罐; 6—电加热器;
 7—引压管; 8—试验段; 9—阀门; 10—水桶。

可更换不同管径的外管。环管流道的内管由黄铜制成。在黄铜内管下部安装定位片 and 上部安装定位孔板共同保证组成同心环管流道或全偏心环管流道。同心环管流道和全偏心环管流道外管直径 D 分别为 12.00 毫米和 12.05 毫米。环管流道内管直径 d 为 10 毫米。环管流道内管外表面和外管内表面光洁度分别为 $\nabla 8$ 和 $\nabla 7$ 。

环形流道内管的纵剖面见图 2，由图可见内管上开有两圈静压测孔，每圈有 4 个直径为 1 毫米的静压测孔。均匀分布在内管上的 4 个静压测孔互相沟通，并会合由一紫铜管将其静压力引出。

三、测量和误差分析

本试验主要测量压力降、流量和温度。

水流流过两圈静压测孔之间静压力降 ΔP ，采用 U 形压差计测量。水流流经环形流道的容积流量 Q ，用磅秤称重，秒表计时，算出容积流量。水流流经环形流道的温度 t 通过玻璃温度计测量。

摩阻系数用熟知的达西 (Darcy) 公式表示：

$$f = \Delta P \frac{d_e}{L} \frac{2g}{\gamma v^2}, \quad (1)$$

将测量值代入(1)式，可改写：

$$f = 2g \frac{(\gamma_{\text{油}} - \gamma_{\text{水}})}{\gamma} \frac{(D-d)}{L} \frac{F^2}{Q^2} \Delta h. \quad (2)$$

摩阻系数根据(2)式计算， $\frac{\Delta f}{f} = \pm 3.8\%$ 。

同理，雷诺数的相对误差按照下式计算：

$$\text{Re} = \frac{d_e v}{\nu} = \frac{(D-d) Q}{\nu F}, \quad (3)$$

给出， $\frac{\Delta \text{Re}}{\text{Re}} = \pm 2.0\%$ 。

摩阻系数误差在座标的垂直方向给出^[6]，雷诺数误差在座标水平方向给出。

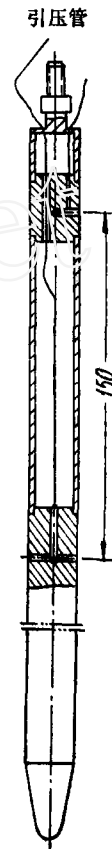


图 2 环形流道内管剖面图

四、试验结果和分析

经过整理，我们的试验得到了狭窄同心环管流道 ($D/d=1.20$, $d_e=2$ 毫米) 在层流区的摩阻系数公式： $f=64 \text{Re}^{-1.0}$ ；在湍流区 ($2 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^4$) 的摩阻系数公式： $f=0.288 \text{Re}^{-0.25}$ ；同时还得到了狭窄全偏心环管流道 ($D/d=1.205$, $d_e=2.05$ 毫米) 在湍流区 ($2 \times 10^3 \leq \text{Re} \leq 5 \times 10^4$) 的摩阻系数公式： $f=0.245 \text{Re}^{-0.25}$ 。这些结果如图 3 所示。

首先，我们将一般同心环管流道通用的努森和卡茨公式 $f=0.304 \text{Re}^{-0.25}$ 和我们的结果进行比较，在湍流区，狭窄环管要低 5%。

我们的结果和迪安的试验结果进行了仔细的比较，因为他所试验的环管流道 D/d 为 1.06~1.29, d_e 为 0.71~2.69 毫米，这些数据与我们的环管流道最为接近，将我们的 $D/d=1.2$ 代入迪安给出湍流区同心环管摩阻系数公式，得 $f=0.288 \text{Re}^{-0.25}$ ，可见我们的试验结果和此式完全吻合。迪安公式雷诺数适用的范围较窄，只到 1.5×10^4 ，我们将雷诺数

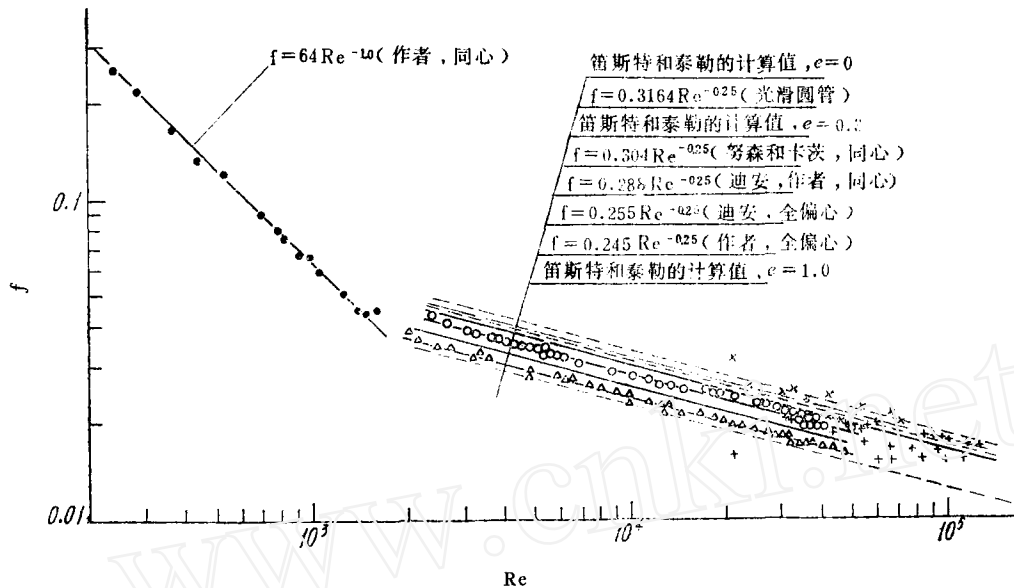


图 3 环管流道摩擦系数和雷诺数关系曲线

●——作者数据(层流,同心); ○——作者数据(湍流,同心); △——作者数据(湍流,全偏心); ×——斯坦等人数据(湍流,同心); +——斯坦等人数据(湍流,0.3 偏心)。

推广到 5×10^4 , 这样可供在堆芯参数下计算使用。

迪安给出在湍流区全偏心环管流道中的摩擦系数公式为 $f = 0.255 Re^{-0.25}$, 比我们的试验结果高出 4% 左右。

我们在层流区获得的摩擦公式与迪安给出的公式也是完全一致的。我们的摩擦公式中系数为 64, 和圆管摩擦公式的系数相同, 这是一个巧合。因为在堆芯中狭窄环管流道中的流体一般处于湍流状态, 因此对层流区的摩擦规律不作仔细的研究。

斯坦等人进行了 $D/d = 1.23$, $d_e = 6.35$ 毫米环管流道摩擦系数的测定, 从图 3 可见, 他们得到的同心环管流道的数据, 高于我们和迪安的数据, 达 15% 左右, 比光滑圆管的结果还要高一点。他们的环管流道虽然 $D/d < 1.3$, 但 $d_e > 3$ 毫米, 因此不能算作狭窄环管流道, 所以和狭窄环管流道的摩擦规律不一致。他们关于偏心环管流道的数据是在偏心率 $e = 0.3$ 的情况下得到的。他们的试验结果散度较大。这部分原因是由于他们的数据不完全是等温工况下的压力降数据, 还包括了环管流道内管有均匀热通量向水中放热时的压力降数据, 对于这些数据他们没有按常规处理, 即对壁面和液流中心处的粘度进行修正^[7]。他们采用进出口平均水温来计算环管流道内水的物性。

笛斯勒(Deissler)和泰勒^[8](Taylor)假设圆管内速度通用分布公式可以应用于非圆管流道, 使用迭代法计算非圆管流道内湍流流速分布, 最后根据算出的速度场计算出摩擦系数和雷诺数关系曲线。他们计算了 $D/d = 3.5$ 同心环管流道和各种偏心环管流道摩擦系数和雷诺数关系曲线。我们选择了同心($e = 0$), 偏心($e = 0.3$), 全偏心($e = 1$)三种环管流道的计算曲线, 和上面的试验结果进行比较。

对同心环管流道来说, 计算结果与斯坦结果最为接近。对 $e = 0.3$ 偏心环管流道来说, 计算结果与斯坦结果也基本上吻合, 只是由于斯坦的数据散度太大一直延伸到全偏心环管流道的计算曲线上去。对全偏心环管流道来说, 我们的试验结果和计算结果是比较接近

的。

从图 3 的试验和计算结果指出,在同一雷诺数下,同心环管流道的摩阻系数值最高,偏心环管流道的摩阻系数值则随着偏心率的增大而减小,全偏心环管流道的摩阻系数值最低。偏低的原因,在笛斯勒和泰勒报告的图五中明确指出,同心时,内管表面上的剪应力是均匀分布、数值相同的。当内管偏心时,内管表面上剪应力不再是均匀分布,靠近外管处,内管表面上的剪应力迅速降低,远低于同心时的剪应力,而靠近中心处又高于同心时的剪应力,综合起来的平均剪应力低于同心管时的剪应力。无因次剪应力就是摩阻系数,因此,偏心时摩阻系数值比同心时摩阻系数值要低。当内管接触外管时,剪应力为 0,因此,全偏心时的平均剪应力最低,摩阻系数值也就最小。

根据上面的分析,我们的结果和迪安的试验结果最为吻合,这是在预料中的。有关环管流道(包括狭窄环管流道)摩阻规律,特别是偏心情况下的摩阻规律,一时还没有找到规律性的结果,进一步开展这方面的试验和理论分析是有意义的。

五、结 论

我们的试验得到如下几点结论:

(1) 试验给出了湍流区($2 \times 10^3 \leq Re \leq 5 \times 10^4$)狭窄同心环管流道($D/d=1.2$, $d_e=2$ 毫米)摩阻系数公式: $f=0.288 Re^{-0.25}$; 狭窄全偏心环管流道($D/d=1.205$, $d_e=2.05$ 毫米)摩阻系数公式: $f=0.245 Re^{-0.25}$ 。

(2) 试验给出了狭窄同心环管流道($D/d=1.2$, $d_e=2$ 毫米)层流区摩阻系数公式: $f=64 Re^{-1.0}$ 。

(3) 建议使用上面给出的摩阻系数公式时,偏差取 $\pm 10\%$ 。

(4) 我们得到的上述摩阻系数公式是由内管上取得的静压力降数据计算而来的,这和一般由外管上取得静压力降的方法不一样,但是我们得到了同样结果,这就说明在水流稳定区内不论由外管还是由内管取得的静压力降数据都是可靠的。

参 考 文 献

- [1] E. S. Davis, *Trans. ASME*, **65**, 755 (1943).
- [2] R. R. Rothfus et al., *Ind. Eng. Chem.*, **42**, 2511 (1950).
- [3] J. G. Knudsen & D. L. Katz, *Fluid Dynamics and Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1958.
- [4] P. P. Stein et al., *Chem. Eng. Progr. Symposium Ser.*, Vol. 50, No. 11, p. 115, 1954.
- [5] R. A. Dean, WCAP-3269-62 (1965).
- [6] G. Hetsroni et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **34**, 186 (1968).
- [7] 汤焱荪, 反应堆燃料棒束传热(译文集), 原子能出版社, 1978年, 73页。
- [8] R. G. Deissler & M. F. Taylor, NACA TN 3451.

(编辑部收到日期: 1980年9月27日)