

文章编号: 1000-8055(2000)01-0055-04

刷式密封中泄漏流动的多孔介质数值模型

黄学民 史 伟 王洪铭

(北京航空航天大学 404 教研室, 北京 100083)

摘要: 通过对刷式密封的刷子中泄漏流动特点的分析, 可以把刷子当作多孔介质来处理, 从而建立刷子多孔介质的泄漏流动模型, 这样可以简化刷子中复杂的泄漏流动, 便于计算工程实际密封中环形刷子的泄漏量。计算结果与实验对比验证有很好的一致性, 证明此数值模型合理可行。

关键词: 密封; 泄漏; 流动; 模型

中图分类号: TB 42

文献标识码: A

1 刷子中泄漏流动的形式和特点

刷式密封之所以得到国内外的极为重视, 原因就在于其良好的密封性能, 但由于刷子中泄漏流动的复杂性, 目前还没有很好的方法较为准确地计算刷式密封的泄漏量, 这使得刷式密封的工程应用受到影响。本文根据刷子中泄漏流动的特点, 提出把刷子当作多孔介质来处理的泄漏模型, 此数值模型简化了泄漏流动的复杂性, 为准确地计算工程实际中刷式密封泄漏量提供一种实用的方法。

由于刷子中刷丝间空隙的不均匀性作用, 均匀的来流进入刷丝束中就变得不均匀了, 并且从紧密的刷丝束区域向疏松的刷丝束区域偏流, 这些偏流在刷丝排之间逐渐形成同向流和射流, 并产生随机的二次流和旋涡流^[1, 2]。如图 1(a) 中所示, 左图和右图中的区域 1 都有射流和同向流, 左

图中的区域 2, 3, 4 中都有轻微的旋涡流, 在左图区域 1, 4 和右图区域 2 中可以看到当一射流遇到前面紧密的刷丝束, 就会改变运动方向而变成和主流方向垂直的横向流动。正由于刷丝束破坏流动而确保流动的不均匀性, 使流体产生了自密封效应, 横向流动代替向前流动显然是对流体自密封的重要贡献, 它能使横流过刷子的总压降增大从而减少密封的泄漏。

刷式密封出口刷丝排由于受到象刷丝束、不同的空隙、压力降及刷丝弯曲等因素的影响, 其复杂的下游流场如图 1(b) 所示^[1, 2]。左图中区域 1 显示了来自疏松刷丝区域的射流, 区域 3 显示了旋涡流, 左图区域 4 和右图区域 1 中显示了横向流动的存在, 同时与左图区域 4 比邻的区域 2 中显示了单个和多个旋涡流从同向流中分离开的现象。这种流动在空间和时间上都是不稳定的, 但其又似乎有一定的空间对称性和时间周期性, 因此

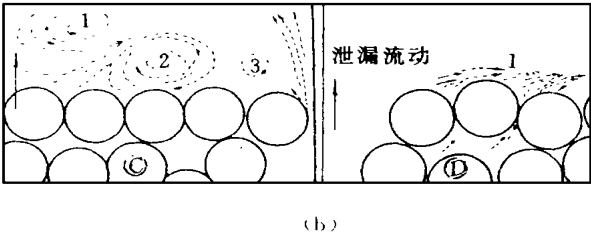
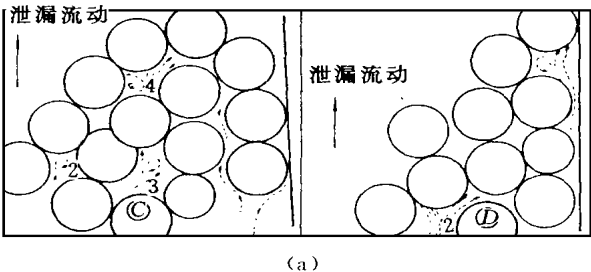


图 1 刷式密封中的流动显示

收稿日期: 1999- 01- 20; 修订日期: 1999- 04- 30

作者简介: 黄学民(1970-), 男, 北京航空航天大学 404 教研室, 博士

可以认为旋涡形成后又耗散为穿过刷子的横掠流动,横掠流动又形成旋涡,这样周期性的反复使流动具有一定的混沌特性,而所有这些复杂的和混沌无序的流场特性是由主动力流和刷丝束及端壁相互影响作用的结果。

概括地说,无论是在环形的刷子中还是在线性的刷子中,其流动都存在 4 种基本形式,即同向流、射流、旋涡流和横向流^[1]。如图 2 所示,当来流通过刷丝有一定间隙的区域一般就变成同向流或射流,而遇到刷丝周向没有间隙而轴向(横向)有间隙的区域就变成横向流,当同相流、射流或横向流进入一较大的空隙区域就有可能产生旋涡流。

图 3 是一个典型刷子泄漏参数 Φ 随上下游压力比 p_u/p_d 变化的实验曲线^[3]。泄漏参数 Φ 是

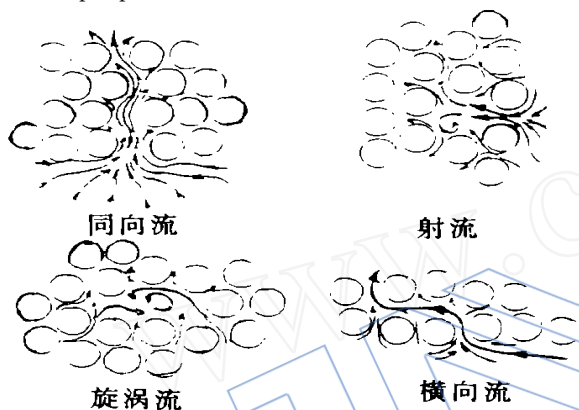


图 2 刷子中的典型流动形式

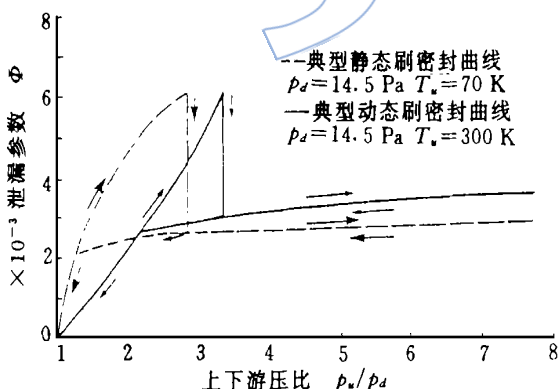


图 3 典型的刷式密封静态和动态的泄漏曲线

个无量纲数,其值为 $\Phi = W \sqrt{T_u} / (p_u A_u)$, 式中 W (lbm/s) 为泄漏流量, T_u (K) 为上游泄漏空气温度, p_u (Pa) 为上游压力, A_u (in²) 为刷子上游迎风面积。由图可看出泄漏随压比增大而增加的总趋势不变,但压比增大到某一定值后其泄漏会突然减少且之后随压比增加的梯度也降低许多。同时泄漏随压比增大和减小的曲线有部分不同路,这

说明泄漏具有“磁滞”特性。刷子泄漏的这些特点可解释为:由于压比的增大,刷子中刷丝的密度增加,刷丝之间的空隙减少而使有效的泄漏面积减少,同时还使泄漏流动的阻力增大,从而使泄漏随压比增加的梯度降低;而当压比增大后又减小时,由于刷丝之间的摩擦阻尼作用,使泄漏随压比减小的变化滞后,从而使泄漏低于同压比增加时的泄漏值。这正符合可压缩多孔介质渗透流的特点。

2 刷子多孔介质泄漏模型及流动的控制方程

由于泄漏流动的压力降主要发生在刷丝区域,而刷子上下游压力差较大,刷子轴向厚度又很小,这使得刷丝区域的压力梯度很大,泄漏空气在刷丝区域的密度变化梯度很大,因此刷丝区域的泄漏空气应当作可压缩的流体考虑。对于图 4 所示的刷子微元体,根据质量守恒定律可得刷丝区域泄漏流动的连续方程:

$$\frac{\partial(\rho \delta_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(r \rho \delta_r V_r)}{r \partial r} = 0 \quad (1)$$

式中: δ_x 和 δ_r 分别为刷子微元体轴向和径向的面孔隙率, V_x 和 V_r 分别为泄漏空气的轴向和径向速度。同时泄漏空气满足理想气体状态方程: $p = \rho R T$, 忽略摩擦热对泄漏流动的影响,假定泄漏流动为等焓流动,则状态方程中的 $T =$ 特征常数。

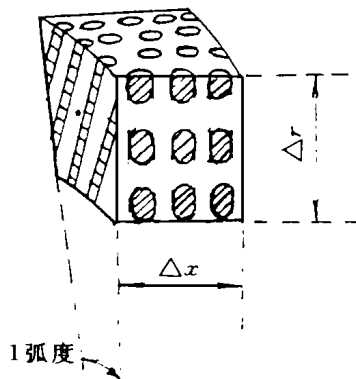


图 4 刷子微元体

对于刷子微元体,根据多孔介质渗透流动的特点^[4],结合粘性流体的动量守恒定律^[5],可导出泄漏流动的动量方程,式中: μ 为动力粘性系数; $\vec{q}$ 为比流量, $\vec{q} = \delta \vec{V}$; K_x 和 K_r 为刷子多孔介质的轴向和径向水力传导系数; $S_{\mu x}$ 和 $S_{\mu r}$ 分别为轴向和径向其它没包括的所有粘性项,其值为:

$$S_{\mu x} = \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\text{div } \vec{q}), S_{\mu r} = \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial r} (\text{div } \vec{q}) - \mu \frac{q_r}{r^2}$$

泄漏流动的动量方程:

$$\begin{aligned} &\left[\frac{\partial(\rho \delta_x V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(r \rho \delta_x V_x V_x)}{r \partial} \right] = \\ &\quad - \delta_x \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{q_x}{K_x} \right) + \mu \cdot \\ &\quad \left[\partial \frac{\delta_x V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial \left(r \delta_x \frac{\partial V_x}{\partial r} \right)}{r \partial r} \right] + S_{\mu x} \end{aligned} \tag{2}$$
$$\begin{aligned} &\left[\frac{\partial(\rho \delta_r V_r V_r)}{\partial x} + \frac{\partial(r \rho \delta_r V_r V_r)}{r \partial r} \right] = \\ &\quad - \delta_r \left(\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{q_r}{K_r} \right) + \mu \cdot \\ &\quad \left[\partial \frac{\delta_r V_r}{\partial x^2} + \frac{\partial \left(r \delta_r \frac{\partial V_r}{\partial r} \right)}{r \partial r} \right] + S_{\mu r} \end{aligned} \tag{3}$$

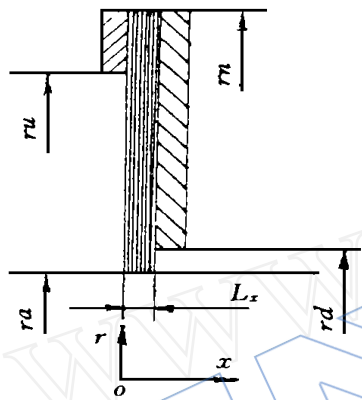


图 5 刷式密封泄漏计算模型

上述的各方程式构成的方程组已封闭, 结合适当的边界条件就可给出定解。参考实际的刷式密封, 给出图 5 所示的计算模型, 其边界条件为:

- 上游边界: $x = 0, ra < r < ru, p = p_u$
 $ru \leq r \leq rn, q_x = 0, q_r = 0$
- 下游边界: $x = L_x, ra < r < rd, p = p_d$
 $rd \leq r \leq rn, q_x = 0, q_r = 0$
- 内边界: $r = ra, 0 \leq x \leq L_x, q_x = 0, q_r = 0$
- 外边界: $r = rn, 0 \leq x \leq L_x, q_x = 0, q_r = 0$
- p_u 和 p_d 分别为刷子上下游空气压强, x 和 r 分别为轴向和径向坐标。

3 刷子多孔介质的水力传导系数的确定

从上述的刷子多孔介质泄漏模型的建立可以发现, 泄漏流动计算的准确性依赖于水力传导系数是否准确, 因此水力传导系数的确定很关键。

水力传导系数是一个表示多孔介质运输流体能力的标量(量纲为 $m^4/(N \cdot s)$), 它与流体及多

孔介质骨架的性质有关, 根据量纲分析, 水力传导系数(Nutting 1930)^[4]可表示为: $K = k/\mu$, μ 为渗透流体的动力粘性系数, k 就是渗透率, 它是一个仅与多孔介质骨架性质有关的参数, 其实用单位是“达西”(量纲为 m^2)。多孔介质的渗透率类似物体的导热系数, 其值的确定主要靠实验和多次实验总结的经验公式。在目前刷子的渗透率还没有实验确定的情况下, 可以根据刷子多孔介质泄漏模型所假设的刷丝径向和轴向分布的规律性, 由泄漏流动轴向和径向的阻力分析导出刷子的径向和轴向的渗透率。

刷子的轴向泄漏流动可以认为是横流过交错排列管束的流动, 其阻力主要是管束对流体的粘性阻力, 根据文献[6]中确定横流过交错排列管束的摩擦阻力系数经验关联式可得: $V_x = (D_v^2/90\mu)(\Delta p/B)(S_T/D_v)^{0.4}(S_T/S_L)^{0.6}$, 和 Darcy (达西) 公式^[4]比较可得刷子轴向的渗透率: $k_x = (\delta_x D_v^2/90)(S_T/D_v)^{0.4}(S_T/S_L)^{0.6}$, 上述各式中 D_v (m) 为水力直径, 其值为 $D_v = 4(V_{open}/S_f)$, V_{open} (m^3) 为多孔介质中孔的体积, S_f (m^2) 为泄漏空气流过多孔介质中的摩擦面积; G ($kg/(m^2 \cdot s)$) 为泄漏流通量; Δp (Pa) 为刷子上下游压力差; B (m) 为刷子轴向厚度; S_T (m) 为刷丝周向间距; S_L (m) 为刷丝排轴向间距。

对于刷子泄漏的径向流动, 比较适合采用多孔介质渗透流的水力半径模型^[4], 此模型将多孔介质的渗透流处理成具有水力半径的毛细管束的流动, 是一个经过实验修正的经验模型。其渗透率为 $k = c_0 T \delta_x R_v^2$, 式中 R_v 为水力半径, 是水力直径的 1/4, 即 $R_v = (1/4) \cdot D_v$; 系数 $c_0 T = 0.4$ 最符合实验数据。因此, 刷子径向的渗透率为: $k_r = (\delta_x \cdot D_v^2)/40$ 。

4 泄漏量计算和实验的对比分析

利用上述的多孔介质的泄漏数值模型, 对发动机某研究所实验的刷式密封进行了数值计算, 其几何尺寸均采用该所实验的刷式密封真实尺寸, 计算结果和实验的对比如图 6 所示。

由图可以看出计算值和实验值在趋势上是完全一致的, 而且差别也不大, 计算的结果是令人满意的, 这说明此计算泄漏流动的数值方法是合理可行的。但是随着上下游压力差的增加, 计算的误差就越来越大了, 这主要是因为计算模型中没有考虑刷子多孔介质的可压缩性所致, 刷子泄漏实

验中的“迟滞”现象充分说明刷子属于具有可压缩性多孔介质, 因此为了计算得更准确些, 应该在计

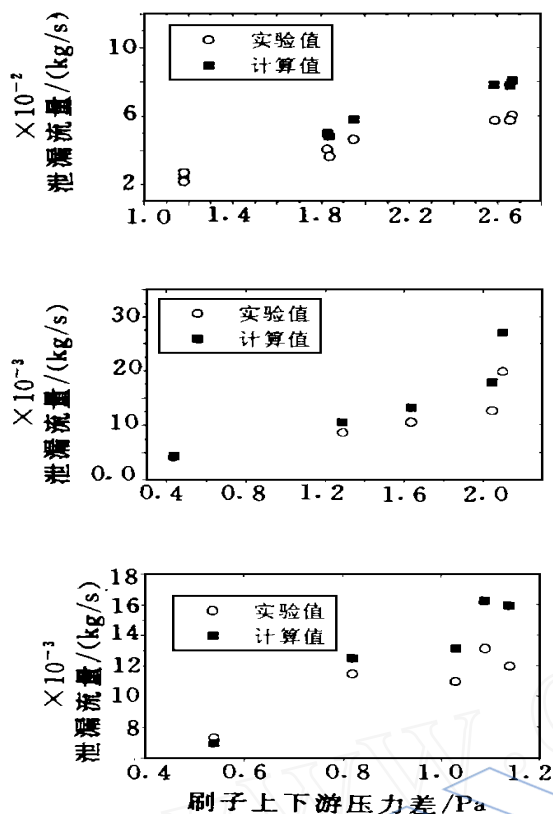


图6 计算和实验的比较图

算上考虑刷子的可压缩性。对于刷子这样的可压缩多孔介质, 可以认为随着上下游压力差的增加, 刷丝间的压紧力明显增大, 这样就增大了刷丝中泄漏流动的阻力, 也就是说压差的增加使刷子多孔介质的渗透率减小了。根据计算刷子多孔介质模型的建立, 我们可以看出考虑刷子多孔介质的可压缩性最合适的办法, 就是在刷丝密度上加一个刷子可压缩性的修正系数, 通过一定的实验找

出此修正系数的规律曲线, 利用这个曲线就能使计算的精确性大大提高。此修正系数只和刷子上下游压力差有关, 可以预见可压缩的修正系数的曲线是一个随压差逐渐增加而增大, 而增大的梯度又逐渐减小的曲线。

5 结 论

本文根据实验对刷子中泄漏流动的形式和特点进行了分析, 提出可以把刷子当作多孔介质来处理的方法, 从而建立刷子多孔介质的泄漏流动数值模型, 并导出流动的控制方程, 经过计算和实验的对比分析, 证明此方法是可行的。此计算方法简化了泄漏流动的复杂性, 为较为准确地计算工程实际中刷式密封泄漏量提供一种实用的方法。

参 考 文 献

- 1 Braun M J, Hendricks R C, Canacci V. Flow Visualization in a Simulated Brush Seal[C]. ASME Paper 90- GT- 217, 1990
- 2 Braun M J, Canacci V A, Hendricks R C. Flow Visualization and Quantitative Velocity and Pressure Measurements in Simulated Single and Double Brush Seals[C]. STLE Paper 90- AM- 7F- 2, 1990
- 3 Holle G F, Krishnan M R. Gas Turbine Engine Brush Seal Applications[R]. AIAA Paper 90- 2142, 1990
- 4 贝尔 J. 多孔介质流体动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983
- 5 陈矛章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 6 Knudsen J G, Katz D L. Fluid Dynamics and Heat Transfer [M]. McGraw - Hill Book Company, Inc , New York, 1958: 323- 341

(责任编辑 杨再荣)

Porous Medium Leakage Flow Model of Brush Seal

Huang Xuemin, Shi Wei, Wang Hongming

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract In order to simplify the complex leakage flow in a brush and make it easy to calculate in real circular brush seal, a porous medium leakage flow model is established by means of characteristic analysis of the leakage flow in the brush. The numerical model is reasonable and practicable because the calculated results show a good agreement with experimental data.

Key words: sealing; leakage; flow; modelling