

迷宫密封的湍流增阻*

刘有军

(北京工业大学生物医学工程中心 北京 100022)

摘要: 迷宫密封是依靠节流间隙中的节流过程和迷宫空腔内的动能耗散过程来实现密封的, 这两个流体流动过程从本质上规定了迷宫密封的密封性能。通过密封内部流动本质的研究, 可以利用湍流流动的一些规律和特点, 发挥密封内部湍流的增阻作用, 提高密封性能。通过对一种锯齿形迷宫密封的数值和试验研究, 揭示了湍流惯性偏转和射流收缩在湍流增阻中的作用。利用这些湍流增阻的原理, 可以突破节流间隙的微小尺寸限制, 实现较大间隙下的良好密封, 这不仅会给迷宫密封的制造、安装及运行等带来很大的方便, 而且可以为发展新的迷宫密封理论奠定理论基础。

关键词: 迷宫密封 流场模拟 射流偏转 密封机理 湍流增阻

中图分类号: TB42

0 前言

迷宫密封是流体机械中应用非常广泛的一类非接触密封, 如各种透平机械的级间、轴端密封等。它是由一系列与转轴非接触的节流间隙和其后的耗散空腔组成的, 节流间隙的作用是把上游流体的压力能通过节流作用转化为速度能, 耗散空腔的作用是把该速度能通过湍流涡流耗散为热能而不使其恢复为压力能^[1,2]。传统上, 间隙的节流作用是依靠节流间隙的微小尺寸来保证的。根据流体力学理论, 节流间隙越小, 泄漏气体流过节流间隙时获得的速度就越大, 则节流间隙后耗散空腔内的涡流就越强, 动能耗散作用也就越强, 即压力损失或密封阻力越大, 密封效果越好。所以, 为了提高密封性能, 必须使节流间隙足够小且短(一般为 $0.2+0.6d/1000$ mm, 其中 d 为旋转轴的直径, 间隙长度(或齿厚)通常小于 0.5 mm), 以使压力能够充分地转变为速度能; 同时还要求节流间隙后的空腔足够大(齿间距一般为 $5\sim 9$ mm), 以使有足够大的空间来形成正确的涡流, 使动能尽可能多地耗散为热能。非常小的节流间隙会对迷宫密封的加工、安装提出非常高的要求, 这使得迷宫密封成了流体机械的极易损件, 而密封一旦失效, 往往需要停机维修、更换, 造成很大的经济损失。

迷宫密封是依靠节流间隙中的节流过程和空腔内的动能耗散过程来实现密封的, 这两个过程都是流体的流动过程, 遵从流体力学的普遍规律, 并且从本质上决定了迷宫密封的密封性能。所以, 可以

通过密封内部流动本质的研究, 合理利用湍流流动的规律和特点, 如湍流的惯性偏转和射流收缩等, 充分发挥密封内部湍流的增阻作用, 提高密封性能。通过对一种锯齿型迷宫密封内部流动的数值模拟和宏观静态密封性能的试验研究, 揭示了湍流增阻的本质就是流动的惯性偏转和射流收缩。利用湍流增阻的概念和原理, 可以突破节流间隙的微小尺寸限制, 实现较大间隙下的良好密封。这不仅会给迷宫密封的制造、安装等带来极大的方便, 而且也会对传统迷宫密封理论的发展产生积极的影响, 同时对其他形式的非接触流体密封具有很好的借鉴作用。

1 锯齿形迷宫密封机理的研究

锯齿形径向迷宫密封, 如图1所示。它把迷宫空腔做得非常小, 而节流间隙则相对较大, 这是它独特于一般迷宫密封最显著的特点。可以预见, 对于这种迷宫密封, 从密封的内部流动过程到宏观的密封性能, 与普通的迷宫密封均会有所不同。

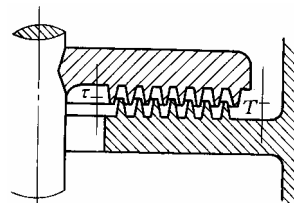


图1 锯齿形径向迷宫密封

1.1 试验研究

1.1.1 试验装置

采用轴对称多齿试验模型^[3,4], 装置结构如图2, 密封齿及齿腔的结构如图3所示。

1.1.2 试验方法

试验重点考查了齿插入长度对密封性能的影响。

* 中国石油天然气总公司石油科技中青年创新基金项目。20030526 收到初稿, 20030915 收到修改稿

响。齿插入长度的改变是通过改变图2中调节垫片的厚度来实现的。

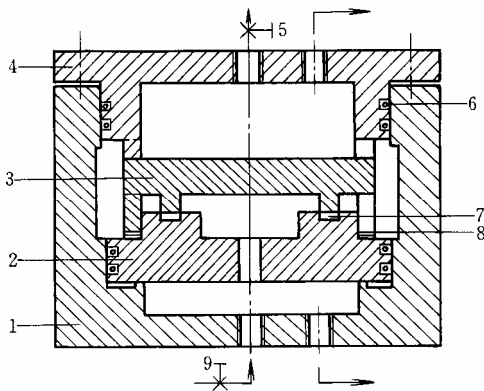


图2 锯齿型径向迷宫密封试验装置

1. 筒体 2. 下密封环 3. 上密封环 4. 端盖 5. 出口调节阀
6. O形密封圈 7. 密封齿 8. 调节垫片 9. 入口调节阀

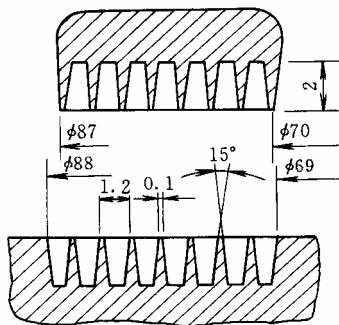


图3 迷宫密封齿腔结构

试验中,对于一定的齿插入长度,首先通过入口调节阀来设定密封入口的压力并保持不变,然后改变密封出口调节阀的开度以调节密封泄漏量(标准状态),使泄漏量依次达到几个预定的值,记录与泄漏量对应的密封出入口压差,从而得到一定入口压力下,泄漏量与密封压差的对应关系。

试验中,①齿插入长度分别取为-0.2, -0.1, 0, 0.1, 0.2, ..., 1.4, 1.6 mm。它是通过改变调节垫片的厚度来实现的,垫片是由不同厚度的不锈钢薄片做成的,其厚度误差不超过 0.01 mm,可以保证齿插入长度较为精确的调节。②预定的泄漏量分别为 5、10、15、20 和 25 m³/h。泄漏量是由转子流量计测量的,它的量程为 25 m³/h。③入口压力分别设定为 0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 MPa。入口压力和出口压力都是由精度为 0.4 级的精密压力表测量的,其量程均为 0.7 MPa。为精确起见,入口和出口的压差是由压差传感器测量的。

1.1.3 试验结果

对于不同的齿插入长度 τ , 给定相同的入口压力和泄漏量, 分别测量相应的密封压差, 得到齿插入长度对密封性能的影响。图 4 为入口压力为 0.2

MPa、泄漏量为 20 m³/h 时, 不同齿插入长度时单位质量泄漏下的密封压差。不难看出, 齿插入长度对密封性能的影响是较大的。当相对齿插入长度 $\tau/h \leq 0$ 时(齿之间没有相互插入), 密封效果随着齿插入长度的增加而增加, 当 τ/h 达到零时, 密封压差最大, 密封效果最佳。当 τ/h 继续增加时, 密封压差并没有随之增加, 反而减小, 直到 τ/h 达到 0.35 (齿插入长度为 0.7 mm) 时, 密封压差达极小值。之后, 随着齿插入长度的进一步增加, 密封压差又增加。

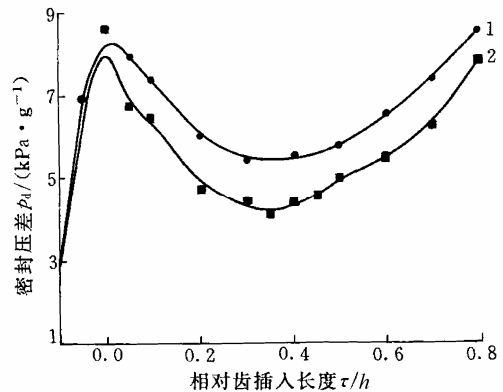


图4 不同齿插入长度时的密封压差

1. 计算值 2. 试验值

1.2 数值研究

为了从密封内部流动的本质上来解释上述试验现象, 对该密封进行了数值研究。

图 5 为迷宫密封流场数值模拟的计算模型, 图 3 为其中密封齿腔的结构尺寸。迷宫密封内部的流动采用可压缩轴对称流动的雷诺平均 Navier-Stokes 方程及 $k-\varepsilon$ 湍流模型来描述。在柱坐标系中, 流动的控制方程共有 7 个, 写成统一形式有^[5]

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \phi) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\Gamma \phi \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = S_\phi \quad (1)$$

当 ϕ 取不同值时, 式(1)分别代表连续方程、轴向、径向和周向的动量方程、能量方程及 $k-\varepsilon$ 湍流模型方程, 各方程对应的 ϕ 、 Γ_ϕ 及源项 S_ϕ 列于下表。

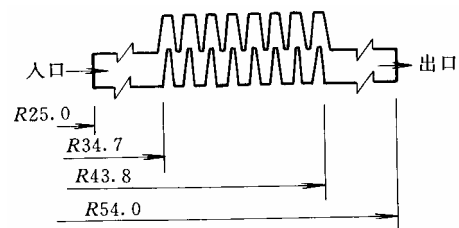


图5 迷宫密封计算模型

表 迷宫密封内部流动控制方程

| ϕ | Γ_ϕ | S_ϕ |
|---------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 0 | 0 |
| u | η_e | $-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta_e \frac{\partial v}{\partial r} \right)$ |
| v | η_e | $-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \eta_e \frac{\partial v}{\partial r} \right) - \frac{2}{r^2} \eta_e v + \frac{\rho}{r} w^2$ |
| w | η_e | $-\frac{w}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r \eta_e) - \frac{\rho}{r} v w$ |
| T | $\frac{\eta_e}{Pr}$ | $\frac{1}{c_p} \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{c_p} (\eta_e G' + \rho \varepsilon)$ |
| k | $\frac{\eta_e}{\sigma_k}$ | $\eta_e G' - \rho \varepsilon$ |
| ε | $\frac{\eta_e}{\sigma_\varepsilon}$ | $C_1 \frac{\varepsilon G}{k} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$ |

表中

η_e ——有效粘性

$$\eta_e = \eta_L + \eta_t$$

η_L ——层流粘性

η_t ——湍流粘性

$$\eta_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

r, θ, x ——柱坐标系

u, v, w ——轴向、径向和周向速度分量

p ——压力

ρ ——密度

c_p ——比定压热容

$C_1, C_2, C_u, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, Pr$ —— $k-\varepsilon$ 模型常数

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_u = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.22, Pr = 0.9$$

而

$$G' = 2 \left[\left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{v}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right] \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + \rho k \right]$$

式(1)的求解还需补充状态方程。对于理想气体而言，其状态方程为

$$p = \rho R h \tag{2}$$

式中 R ——气体常数

采用 Taylor-Galerkin 有限元法求解上述可压缩轴对称流动的控制方程^[3,6]。数值模拟重点考查了不同齿插入长度时密封内部的流动形态及其密封性能(即泄漏量与密封压差之间的关系)。相对齿插入长度分别取为 $\tau/h = -0.10, -0.05, 0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70, 0.80$ ，其中， τ 为齿

插入长度， h 为密封腔深度，负的 τ/h 表示密封齿之间没有相互插入。计算条件为相同的入口条件，即相同的体积流量 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ，相同的出口压力 0.1 MPa ，相同的入口温度 293 K 。计算得到了不同齿插入长度时密封内部的流动形态及密封性能，图4为不同齿插入长度时的密封性能(以单位质量泄漏量对应的密封压差来表示，为方便比较，与试验结果绘在同一图上)，图6为不同齿插入长度时密封内部的流线图。

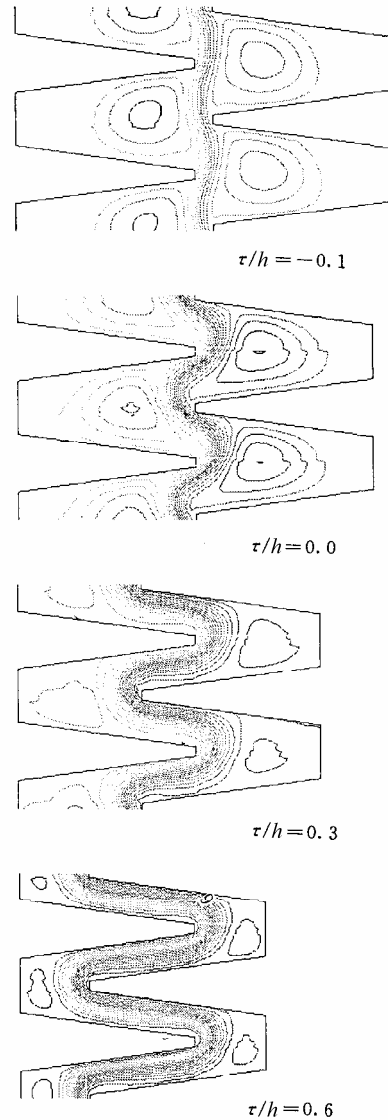


图6 密封内部流动的流线图

1.3 密封机理

从图4中可以看到，当相对齿插入长度从-0.10逐渐增加时，密封性能先提高，再降低，然后又提高，密封存在一个最佳的相对齿插入长度，最佳齿插入长度为 $\tau/h=0$ ，这与试验结果一致，并且数值模拟结果与试验结果在数值上也吻合得非常好，说明了数值模拟的正确性和可靠性。

迷宫密封的宏观密封性能, 取决于内部流动的节流过程和动能耗散过程, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 当相对齿插入长度 $\tau/h < 0$ 时, 由于“直通”效应的存在, 泄漏介质可以以较小的阻力直接通过密封。随着相对齿插入长度的增加, 齿顶逐渐起到了节流的作用, 流束在齿顶产生了收缩。当相对齿插入长度增加到零时, 流束会在齿顶产生很大的收缩, 并且流束会在间隙中发生强烈的偏转, 使间隙中的流动偏向间隙的一侧。此时, 可以看到迷宫空腔内的回流涡流一直延伸到了节流间隙内, 使间隙中的有效通流面积大为减小, 因而泄漏介质可以在节流间隙中获得较高的速度, 同时, 由于此时迷宫空腔也很大, 来自间隙的高速流体可以通过粘性驱动作用在空腔内形成很强的湍流涡流, 使节流间隙产生的速度能尽可能多地耗散为热能, 产生良好的密封效果。当相对齿插入长度进一步增加时, 节流间隙的长度增加, 流束在齿顶产生的收缩, 会在间隙流动过程中扩散, 使流体在齿顶节流过程中获得的速度能, 部分地恢复为压力能。当相对齿插入长度达到 0.30 时, 流束扩散充满了整个节流间隙, 此时, 流束在齿顶的节流收缩效应大为减弱, 同时, 迷宫空腔进一步减小, 空腔耗散特性变差, 使整体的密封性能降低。当相对齿插入长度进一步增加时, 迷宫空腔进一步减小, 耗散涡流几近消失, 整个密封的流动更接近于间隙流动。此时, 虽然齿顶的节流效应很小, 但泄漏介质在齿顶处急转弯, 会产生较大的局部阻力损失, 连同间隙流动沿程摩擦阻力的增加, 使整个密封的阻力增加, 密封性能提高。

所以, 当 τ/h 较小时, 间隙中的有效通流面积减小, 因而流速高, 与此同时, 空腔容积也较大, 空腔内能够形成大而强的耗散涡流, 从而提高密封效果, 表现为较大的密封压差; 随着 τ 的增加, 由于间隙中的射流扩散, 使压力回升, 这会大大影响间隙中的转能效果, 使流束进入下一个空腔时的速度降低, 从而影响空腔内耗散涡流的强度, 同时, 由于空腔容积的减小, 也影响了耗散涡流的大小, 这样, 耗散涡流的强度降低及涡流大小的减小, 降低了湍流动能的耗散效果, 表现为密封压差的降低。但是, 当 τ 增加到一定程度, 尽管空腔的涡流耗散作用越来越弱, 但间隙的实际宽度大为减小, 间隙长度大大加长, 使间隙的沿程摩擦阻力损失增加很大, 整个密封的性能更接近于间隙密封, 同时齿尖处流动急剧转弯, 增加了局部阻力损失, 使密封效果得以加强, 表现为密封压差的增大。

可见, 由于节流间隙中射流偏转的存在, 当节流间隙较大(即较小的齿插入长度)时, 密封可以具

有与节流间隙足够小(即齿插入长度足够大)时相当的密封效果。这一点对于迷宫密封的设计是相当重要的, 即可利用间隙中的射流偏转来取代微小的节流间隙, 这将会给迷宫密封的加工、装配及安全运行带来极大的方便。

2 迷宫密封的湍流增阻

迷宫密封节流间隙中的节流过程和迷宫空腔内的湍流动能耗散过程, 从本质上规定了迷宫密封的密封性能。节流间隙的转能效果好, 即泄漏介质流经节流间隙时获得的速度能(由压力能转换而来)越多, 迷宫空腔的湍流动能耗散效果越强, 即湍流动能通过涡流流动转换成的热能越多, 迷宫密封的密封效果就越好。传统的迷宫密封设计理论中, 间隙的节流作用是依靠节流间隙的微小尺寸来保证的, 即节流间隙做得尽可能小, 这对迷宫密封的加工和制造提出了很高的要求。这种理念, 完全来自于迷宫密封的热力学分析, 即泄漏介质流经节流间隙时获得的速度与节流间隙的面积成反比。对一种锯齿形径向迷宫密封的数值研究表明, 尽管节流间隙的物理尺寸不是很小, 但是, 由于节流间隙中射流偏转的存在, 当节流间隙较大(即较小的齿插入长度)时, 密封可以具有与节流间隙足够小(即齿插入长度足够大)时相当的密封效果。这就是利用湍流流动的规律提高了密封的性能, 实现了迷宫密封的湍流增阻。

参考文献 [7,8] 通过数值模拟的方法, 也证实了射流偏转在提高迷宫密封效果、降低对节流间隙微小尺寸要求中所起的作用。作者对一种阶梯型迷宫密封进行了数值研究, 通过改变密封阶梯台阶的高度, 发现合适的台阶尺寸可以增强泄漏介质通过节流间隙时的射流偏转程度, 并明显地提高了密封的流动阻力。所以, 利用合理的结构尺寸来增加迷宫密封节流间隙中的射流偏转和流束收缩, 从而提高节流间隙的转能效果, 是迷宫密封湍流增阻的本质。

3 结论

(1) 采用轴对称多齿迷宫密封试验装置, 对锯齿形径向迷宫密封进行了试验研究, 得到了不同齿插入长度下的密封性能。在相同的泄漏量下, 随着齿插入长度从负值开始增加, 密封压差先增加, 后降低, 最后又增加。最佳齿插入长度为 $\tau/h=0$ 左右。

(2) 对锯齿形径向迷宫密封的内部流场进行了

数值模拟, 得到了不同齿插入长度时密封内部的流动形态及相应的密封性能。在最佳齿插入长度时, 由于节流间隙中的射流偏转和流束收缩, 间隙中的有效通流面积最小, 流体可以获得较大的流动速度, 因而迷宫空腔的湍流动能耗散最强, 密封效果最佳。

(3) 合理利用流体的流动规律, 可以用节流间隙中的射流偏转来取代节流间隙的微小尺寸, 实现迷宫密封的湍流增阻, 这对于迷宫密封的加工、安装和运行是非常有益的。

参 考 文 献

- 1 塔鲁达纳夫斯基 K. 非接触密封. 李均卿, 刁无康译. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 2 张建中, 李新成, 刘康林, 等. 石油化工密封技术. 北京: 中国科学技术出版社, 1994
- 3 刘有军. 锯齿型迷宫密封流场的有限元模拟及泄漏特性的数值预报: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 1997
- 4 刘有军. 锯齿型径向迷宫密封的试验研究. 化工机械, 1998, 25(3): 141~143
- 5 鲁周勋, 谢友柏, 丘大谋. 迷宫密封中流场的有限差分模拟. 应用力学学报, 1992, 9(3): 87~92
- 6 刘有军, 杨晓翔. 锯齿型径向迷宫密封的数值研究. 计算力学学报, 2000, 17(3): 355~359
- 7 Rhode D L, Guidry M J. Importance of labyrinth seal through-flow deflection for enlarging clearance without increasing leakage. Tribology Transaction, 1993, 36(3): 477~483
- 8 Rhode D L, Ko S H, Morrison G L. Experimental and numerical assessment of an advanced labyrinth seal. Tribology Transaction, 1994, 37(4): 743~750

RESISTANCE ENHANCEMENT OF LABYRINTH SEAL BY TURBULENCE

Liu Youjun

(College of Life Science and Bioengineering, Beijing
University of Technology, Beijing 100022)

Abstract: The property of labyrinth seal relies on the throttling process in clearance and the dynamic dissipating process in cavity, these two procedures play decisive roles in essential to the sealing property of the labyrinth. Study on the flow field in labyrinth seal is helpful for us to make use of some characters of turbulence in improving the sealing property. Model experiment and numerical simulation are adopted to study the seal mechanism of a crenellated radial labyrinth. It is shown that flow deflection in throttle clearance can effectively decrease the actual flow area in the clearance and improve the seal property. Thus the flow deflection in throttle clearance can be utilized to replace the small clearance, and a better seal property can be achieved under condition of wide clearance. This is of great importance to the design, production and operation of labyrinth, and lays a foundation for the invention of newly constructed labyrinth seal.

Key words: Labyrinth seal Flowfield simulation
Flow deflection Seal mechanism
Resistance enhancement by turbulence

作者简介: 刘有军, 男, 1965 年出生, 副教授, 博士后。主要研究方向为计算力学及医学图像处理。

E-mail: lyjlma@bjut.edu.cn