

迷宫通道内部流动和泄漏特性的数值分析

华中理工大学 黄守龙 马毓义
南京理工大学 武晓松 徐 诚

【摘要】 求解非定常 N-S 方程, 数值预测了深宽比 H/W 分别为 0.1、0.3 和 0.5 的单空腔直齿迷宫通道的内部流动, 计算结果展示了流动结构的振荡及出口泄漏量下降和回升的波动。3 种结构的密封效果优劣与泄漏量波动幅度大小相对应, 其排列顺序是深宽比 H/W 分别为 0.3、0.5 和 0.1 的结构。还讨论了涡运动与涡合并、分离泡的迁移、射流的弯曲及对空腔壁面的冲击等复杂物理过程的内在联系, 分析了射流冲击所产生的多种效应对增加能耗减小泄漏的作用。

主题词: 迷宫密封 振荡流动 数值分析
分类号: V211.18

1 引言

80 年代以来, 许多研究者开始致力于对迷宫通道内部流动问题的探索^[1~5]。但这些以平均流动为特点的数值计算和实验测量, 只能揭示迷宫通道内部流动的稳态特性, 因而不能解释和揭示许多与非稳态流动相关的现象及机理。直到最近, 才有人将密封特性与迷宫通道中的流动结构不稳定联系起来。Ha et al.^[6]在对平板蜂窝间隙的密封试验中发现, 当 Re 为 10^4 量级时出现摩擦系数跳跃现象, 通过对蜂窝空腔内波动压力的频谱分析, 推断压力波动与流动结构振荡的关系及其对流动阻力的影响。差不多同时, 文献[7]对迷宫通道内非定常流动进行了数值预测, 展示了流动结构不稳定所产生的效应对减小泄漏的重要作用。深入探索迷宫通道内部流场结构的非定常特性, 有可能为全面揭示迷宫密封的流动机理奠定完善的基础。

对于如图 1 所示的迷宫结构, 文献[8]以空气为介质对四空腔结构所进行的密封实验的结果显示, 当空腔深宽比 H/W 约为 0.3 时, 密封效果最佳。

本文力图提供某方面的依据以解释空腔深宽比对泄漏的影响。为此, 对 3 种不同深宽比 H/W (0.3, 0.5, 0.1) 的单空腔迷宫结构的内部流动进行了数值模拟, 通过捕获流动结构的演化细节, 分析不同空腔深度比对密封效果影响的内在物理机制。

2 基本方程及数值方法

考虑轴对称可压缩 N-S 方程

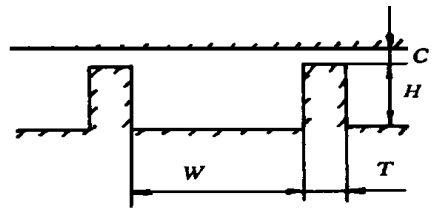


图 1 迷宫结构示意图

$$\frac{\partial U_Y}{\partial x} + \frac{\partial F_Y}{\partial x} + \frac{\partial G_Y}{\partial y} = \frac{\partial F_{eY}}{\partial x} + \frac{\partial G_{eY}}{\partial y} + H_Y \quad (1)$$

其中:

$$U = [\rho, \rho u, \rho v, \rho e]^T, F = [\rho u, \rho u^2 + \rho, \rho uv, \rho u(e + p/\rho)]^T$$

$$G = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, \rho v(e + p/\rho)]^T, F_v = \frac{1}{Re} \left[0, \tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xx}u + \tau_{xy}v + \frac{Y}{Y-1} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x} \right]^T$$

$$G_v = \frac{1}{Re} \left[0, \tau_{xy}, \tau_{yy}, \tau_{xy}u + \tau_{yy}v + \frac{Y}{Y-1} \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right]^T, H = \frac{1}{Re} [0, 0, (-\tau_{xx} + pRe)/Y, 0]^T$$

式中, μ 由 Sutherland 公式确定, $Y = 1.4$, 普朗特数 $Pr = 0.72$ 。

在四边形有限体积单元内积分方程(1), 建立有限体积格式^[7]。其中无粘项用二阶 TVD 方法离散, 粘性项用二阶中心分离散。边界条件处理: 入口给定, 出口给定压力, 其余参数外推; 壁面为无滑移条件、绝热, 压力用反射条件近似。

采用 62×42 的计算网格, 数值计算了深宽比 H/W 分别为 0.1, 0.3 和 0.5 的单空腔迷宫结构的内部流动, 计算条件为: 出入口压力比为 0.32, $Re_c = 2.0 \times 10^4$, $C = 0.5$, $T = 2.5$, $W = 10$ 。

3 计算结果分析

首先讨论模型 I ($H/W = 0.3$) 的计算结果。流动是一种周期性振荡。图 2 的速度矢量图展示了振荡过程中以旋涡和射流为主导的复杂流动结构随时间的演变。在图 2(b) 对应的时刻, 空腔右半部有大涡 A (顺时针旋转), 左半部有大涡 B (逆时针旋转), 射流中部下方有小涡 C (顺时针旋转), 上壁面中部的分离泡造成射流在相应位置下弯, 但射流在空腔出口处几乎平直穿透, 此时涡流腔对密封的贡献主要来自空腔内涡结构的能量耗散, 密封出口泄漏量达到最大值 $\dot{m}_{\max} = 64.8$ 。伴随着小涡 C 的长大、迁移及其与 A 涡的合并, 上壁面分离泡不断向空腔右出口处迁移, 加剧了对射流的阻塞作用, 出口泄漏量不断下降。当分离泡移至空腔出口处时, 下弯的射流直接冲击在空腔的前壁面, 形成分支结构, 一部分气体向下折转增强 A 涡, 另一部分气体向上折转加剧了出口通道的断面收缩。这种附加的流动阻力使出口泄漏量急剧下降, 此时, 泄漏量达到最小值 $\dot{m}_{\min} = 45.8$ (图 2(f))。之后, A 涡处的压力又将下弯的射流在空腔出口处抬起, 逐渐恢复至平直穿透状态, 出口泄漏量也随之上升。分离泡不断经历着形成、迁移至消失的循环过程, 带来的是射流不断重复地经历着弯曲、冲击前壁面至恢复平直穿透的变化, 造成出口泄漏量的周期性下降和回升, 最终导致宏观上平均泄漏量 $\bar{m}$ 的下降。

在这一系列的物理事件中, 射流冲击前壁面对减小泄漏产生重要影响, 冲击直接造成射流动能的损失并造成射流分支。分支结构又带来两种效应, 一方面增强主旋涡而增加能耗, 另一方面加剧了流束在通道出口处的断面收缩。因此, 射流冲击所产生的多种效应将提高结构的密封效率。我们用泄漏量下降幅度 $\Delta \dot{m} = \dot{m}_{\max} - \dot{m}_{\min}$ 来表征冲击效应的强度, 它体现了流动振荡对减小泄漏的贡献程度。

模型 II ($H/W = 0.5$) 的计算结果。同样出现流动振荡, 且流场特性与模型 I 的情形类似, 图 3 展示了某一时刻的流场结构。对于 $H/W = 0.5$ 的情形, 上壁面的分离泡较小, 所造成的射流弯曲程度及产生的冲击效应较弱, 出口泄漏量的下降幅度较小 ($\Delta \dot{m} = 7.0$), 因而, 模型 II 的流动振荡对密封的贡献不及模型 I 的情形。

模型 III ($H/W = 0.1$) 的计算结果。对于这种细长浅腔, 同样出现流动振荡, 但流场结构与模型 I 和模型 II 的情形有较大差异。如图 4 展示的某一时刻流场结构, 射流弯曲至底壁将空

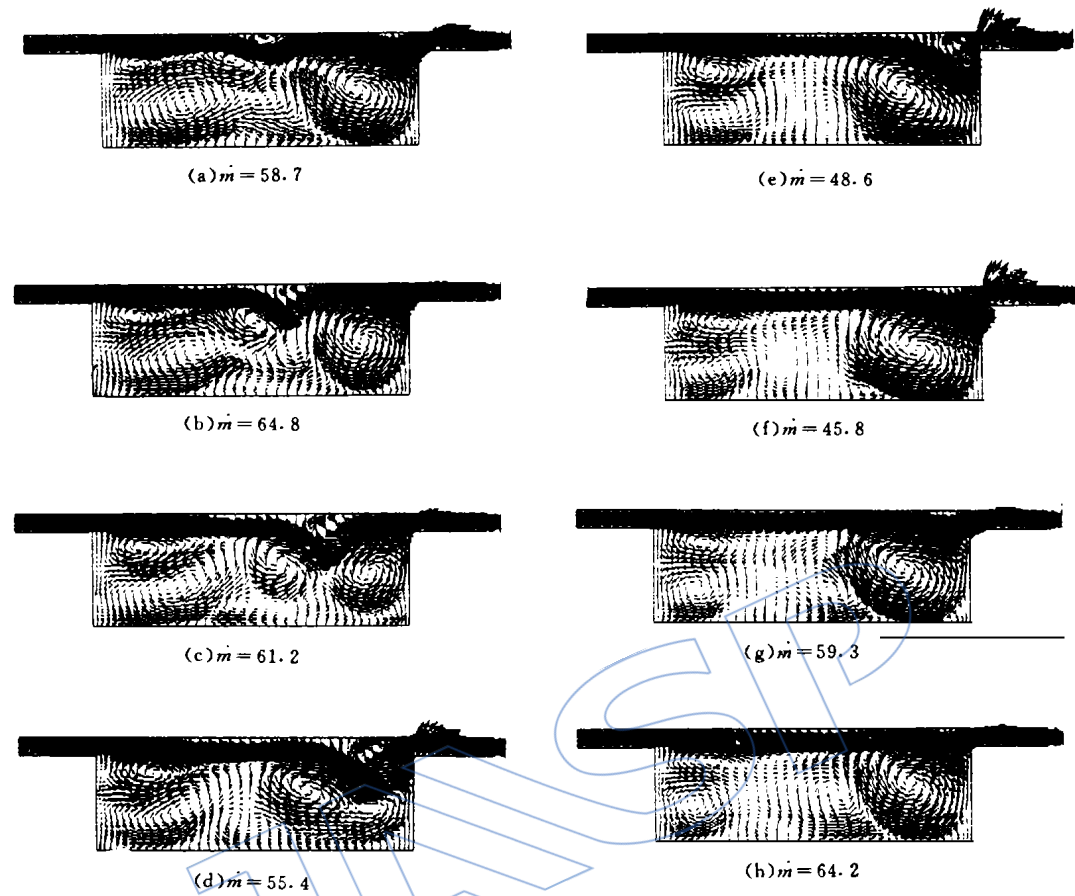


图 2 $H/W=0.3$ 迷宫的流动演化(无量纲时间间隔为 10)

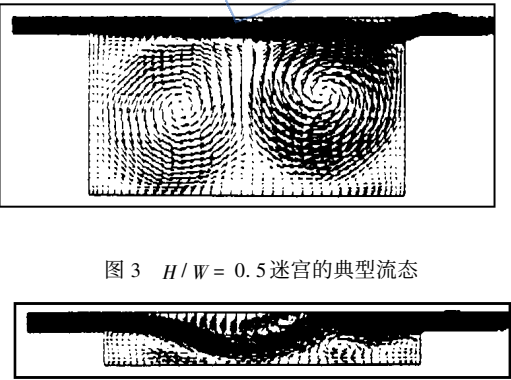


图 3 $H/W=0.5$ 迷宫的典型流态



图 4 $H/W=0.1$ 迷宫的典型流态

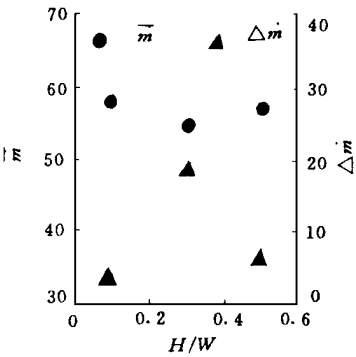


图 5 泄漏量波动及其平均泄漏量

腔分隔成 3 个区域, 各区域的流动结构随时间有微弱变化。其中以空腔右部射流下方区域内的

涡结构变化相对明显, 体现在此区域内两个较弱旋涡的迁移与相互合并, 造成射流在空腔出口处的弯曲及对前壁面的冲击, 导致泄漏量的下降和回升的波动, 只是这时冲击效应很弱, 泄漏量的下降幅度很小($\Delta m^{\circ} = 3.4$)。这种情形下, 流动振荡所产生的效应对密封的贡献很小。

综合上述计算结果, 图 5 给出了 3 种单空腔结构($N = 1$)的泄漏量波动及其平均泄漏量。对比文献[8]的四空腔结构($N = 4$)的密封实验结果, 可以看出, 深宽比对密封效果的影响趋势与实验结果一致。即密封效果的优劣次序是 H/W 为 0.3, 0.5 和 0.1 的结构, 而泄漏量波动幅度的大小次序与此相同, 显示出流动振荡对减小泄漏的贡献与不同深宽比结构密封效果差异之间的联系。

4 结 论

在一定条件下, 迷宫通道内部流动出现振荡现象, 涡运动、涡合并及分离泡的迁移引起射流弯曲及对空腔壁面的冲击。冲击产生的多种综合效应增加了能量耗散和流通阻力, 对迷宫结构减小泄漏起重要作用。这种冲击效应的强弱差异是造成 3 种结构密封效果不同的重要原因之一。

参 考 文 献

- 1 Stoff H. Incompressible flow in a labyrinth seal. J of Fluid Mechanics, 1980, 100
- 2 Rhode D L, Demko J A, Traigner U K, Morrison G L, Sobolik S R. The prediction of incompressible flow in labyrinth seals. ASME J of Fluids Engineering, 1986, 108(1): 19~25
- 3 Demko J A, Morrison G L, Rhode D L. The prediction and measurement of incompressible flow in a labyrinth seal. AIAA Paper 88~190
- 4 Wittig S, Schelling U, Kim S, Jacobson K. Numerical predictions and measurements of discharge coefficients in labyrinth seals. ASME Paper 87- GT- 188
- 5 Morrison G L, Johnson M C, Tatterson G B. Experimental verification of a secondary recirculation zone in a labyrinth seal. ASME Paper 88- 3692
- 6 Ha T W, Morrison G L, Childs D W. Friction- factor characteristics for narrow channels with honeycomb surfaces. ASME J of Tribology, 1992, 114(4): 714~721
- 7 黄守龙. 直通式迷宫密封的实验和数值研究: [学位论文]. 华东工学院, 1991
- 8 黄守龙等. 直通式迷宫静态工作特性的实验研究. 弹道学报, 1994, (3): 43- 47

(责任编辑 魏星禄)

restrictions induced by explicit boundary treatments and, meanwhile, preserve all the important features of the scheme such as non-oscillation and high resolution. The implicit solver effectively accelerates the convergence rate of the high-resolution scheme. The comparison of cascade flow calculations under various inflow conditions with the corresponding experiments demonstrates the accuracy and efficiency of the proposed solver.

Key words Cascade flow Numerical computation High resolution Implicit methods

NEAR SOUND FIELD ANALYSIS OF A ROTATING SOURCE

Ju Hongbin

(*Dept. of Engineering Mechanics Tsinghua University, Beijing 100081*)

Zhong Fangyuan

(*Shanghai Jiaotong University*)

ABSTRACT

On the basis of moving source radiation theory, this paper discusses the sound solution of a rotating source in frequency domain. Emphasis is laid on near sound field which has three "additional sources" in contrast to far field. The computation reveals that the near sound field produced by these "additional sources" distributes in discrete viewing angles. Radial and axial deviations affect sound field respectively around the rotating plane and axial area, and their maximum connections have different characteristics. The analysis is proved preliminarily by a fan experiment.

Key words Sound Radiation Aeroacoustics Sound source Frequency analysis

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW AND LEAKAGE IN LABYRINTH SEAL

Huang Shoulong and Ma Yuyi

(*National Lab. of Coal Combustion Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074*)

Wu Xiaosong and Xu Chen

(*Mechanical College, Nanjing University of Science & Technology*)

ABSTRACT

The unsteady Navier-stokes equations are solved to predict numerically the internal flow of single-cavity labyrinth channel with depth-to-width ratios $H/W = 0.1, 0.3$ and 0.5 . The numerical results demonstrate the oscillation of the flow structure and fluctuation of the exit leakage rate. It is shown that the seal efficiency is relevant to the amplitude of leakage fluctuation, furthermore, the sequence of H/W from $0.3, 0.5$ to 0.1 is also the order of both increasing seal efficiency and increasing amplitude of leakage fluctuation. Also, the complex physics, including motion and mergences of vortex, migration of separation bubble, bending and impact of jet, is discussed, and the influence of impact effects on the increase of energy dissipation and decrease of leakage are analysed.

Key words Labyrinth seal oscillation flow Numerical analysis

METHOD FOR PREDICTING FATIGUE RELIABILITY AND LIFE OF COMPRESSOR BLADE

Le Xiaobin, Gao Deping, He Mingjian

(*2nd Dept, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083*)

ABSTRACT

In engineering application of fatigue problem, it is very difficult to obtain some working parts' load spectrum due to some reasons. This paper provides method for predicting the fatigue reliability and life of the part without working load spectrum. Fatigue tests are carried out on the part that has worked for some time. Basing on the test data, the surplus fatigue damage strength of the part can be calculated. With its surplus fatigue