

文章编号: 1000-8055(2005) 04-0590-05

指尖密封泄漏流动的数值仿真分析

王 旭^{1,2}, 张文平¹, 来 亮², 梁海东²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与核能工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨船舶锅炉与涡轮机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 介绍了指尖密封的基本结构, 并根据指尖密封的结构特点, 提出了指尖密封泄漏流动的数学模型和计算模型。针对影响指尖密封密封特性的主要影响因素, 用 FLUENT 流体分析计算软件对该计算模型进行了数值仿真计算, 最后给出了数值仿真计算的结论。

关键词: 航空、航天推进系统; 指尖密封; 泄漏流动; 数学模型; 压差

中图分类号: TB42

文献标识码: A

Numerical Simulation and Analysis of a Finger Seal Leakage Flow

WANG Xu^{1,2}, ZHANG Wen-ping¹,
LAI Liang², LIANG Hai-dong²

(1. School of Power and Nuclear Energy Engineering,
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute, Harbin 150036, China)

Abstract: The Basic structures of finger seal were introduced, and according to the features of finger seal structure, the mathematic model and calculating model of finger seal leakage flow were set up. In the light of the main affecting factors of finger seal leakage characteristics, the numerical simulations and analysis were done using the CFD software FLUENT. Some important conclusions were given in the paper.

Key words: aerospace propulsion system; finger seal; leakage flow; mathematic model; pressure difference

随着燃气轮机的性能不断发展到新的水平, 密封的泄漏已成为影响发动机性能的主要因素之一。通过对军用、民用发动机进一步提高性能的诸多潜力因素研究表明, 改进和发展密封技术是有着巨大潜力的发展领域。美国在其联合涡轮先进燃气发生器项目的第三阶段目标(JTAGG III)中指出, 通过该项目的实施, 争取燃气轮机燃料消耗减少 40%, 增加发动机的轴功率与重量比达到

120%, 减少生产成本 35%, 减少维护费用 35%, 并指出改进和开发新的密封技术是达到这些目标的一个有效手段^[1,2]。与发动机气动部件的性能改进相比, 改进和发展新的密封技术, 是收益大而耗资少的途径。同时随着发动机热力循环参数的不断提高, 密封的工作条件明显恶化, 传统的密封技术已不能完全满足要求。这就要求人们不断研究和探索新的密封形式。美国 AlliedSignal 发动机

收稿日期: 2004- 07- 16; 修订日期: 2004- 12- 05

作者简介: 王旭(1963-), 男, 辽宁沈阳人, 哈尔滨工程大学在职博士生, 中国船舶重工集团公司第 703 研究所研究员, 主要从事涡轮机结构强度、振动噪声、润滑与密封等领域的研究。

公司最先提出了指尖密封的思想,并申请了专利^[3],接着美国 Honeywell 发动机公司、NASA Glenn 研究中心以及 Akron 大学相继开展了指尖密封技术的研究^[4,5]。近年来我国也开始了指尖密封技术的研究,但主要是关于结构与强度方面的研究^[6~9]。

1 指尖密封结构简介

指尖密封是从刷式密封衍变而来的,其结构也与刷式密封相似,它是用一组刷片取代刷式密封的刷丝,因此,指尖密封保留了刷式密封随转子径向跳动、离心变形及热膨胀变形柔顺性的特点,即转子发生上述情况时,只要在允许的设计范围内,系统的密封性能并不受到破坏,这也正是指尖密封和刷式密封优于篦齿密封和蜂窝密封的地方。指尖密封一般是由前后遮流板、前后隔片、高压密封单元和低压密封单元通过周向均布的铆钉铆接起来的组合结构,密封单元的厚度一般为 0.4 mm 左右,材料为耐热、耐磨且有较好韧性、

介质的工作温度和压力而定。

2 数学模型与计算模型

2.1 数学模型

指尖密封高低压两端的压差和泄漏流动达到平衡的状态下,气流在密封间隙内的流动可以认为是三维定常的稳态流动,在这个基础上对密封间隙内的流体建立数学模型。由于密封间隙非常小,壁面的粗糙度、气体的粘性以及流体在密封间隙内流动的雷诺数等,都会对气体的流动产生很大的影响,因此,计算模型采用了带壁面函数的 $k-\epsilon$ 模式,计算软件采用的是工程上普遍采用的 FLUENT 流体分析计算软件。

2.2 计算模型

根据指尖密封的结构,气体的流道被分成如图 2 所示的 4 个部分:① 法兰与轴进气端构成的流道;② 前遮流板与轴构成的流道;③ 密封与轴之间的流道;④ 法兰与轴出气端构成的流道。

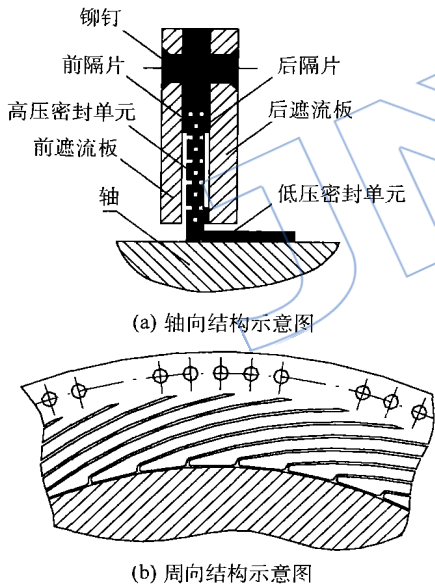


图 1 指尖密封结构示意图

Fig. 1 The Structure of finger seal

弹性和较高机械性能的镍基或钴基高温合金。密封单元做成带有一定曲线形状和一定数目的指尖臂,指尖臂端部做成带有一定形状的指尖靴,低压密封单元的指尖靴沿轴向有 10 mm 左右的长度,图 1 为指尖密封结构示意图。在结构设计上,前一级密封单元的指尖臂正好阻挡下一级密封单元两相邻指尖臂的缝隙。指尖密封环与轴的配合一般为过渡配合,具体要视转子的工作转速以及流体

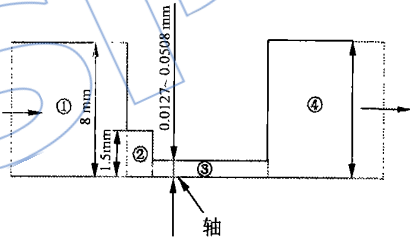


图 2 指尖密封计算域

Fig. 2 Calculating area of finger seal

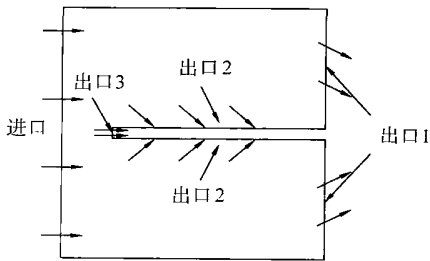


图 3 简化计算模型

Fig. 3 Simplified calculating model

由于密封间隙很小(0.012 7~0.050 8 mm),为了控制网格划分的数量,计算模型只取图 2 中高压和低压密封单元部分,这对分析计算密封间隙内流动状况没有太大的影响,又能减少大量的计算网格。气体在通过高压密封单元后分成 3 部分流出低压指尖垫:出口 1、出口 2 和出口 3。由于指尖沿周向具有循环对称结构,气体在密封间隙

内的流动是定常流动, 在每一个周期内的流动都是相同的, 因此, 可取一个周期进行计算。此外, 由于密封间隙非常小, 而圆弧半径相对较大(58 mm), 循环对称周期较多(54 个循环对称结构),

的质量, 而且对计算精度也不会有太大的影响。计算的边界条件为给定进口的压力和温度, 给定出口的压力, 模型的两侧面取周期边界条件, 模型的上下墙面给定壁面粗糙度和壁面函数。

3 指尖密封泄漏流动的数值仿真

3.1 密封泄漏流动的流场分布

图 4 为密封泄漏通道内的速度和压力分布情况。从图 4 中可以看出, 当密封间隙和压差都比较小时, 出口 1 附近的速度很小, 几乎可以忽略不计, 而出口 3 的速度已达到 317 m/s。同时密封间隙内的压力梯度也不均匀, 出口 3 附近最为集中, 并向两边发散, 这表明出口 3 附近的速度变化最为剧烈, 流动损失也最大。随着压差和密封间隙的增大, 气流泄漏的速度迅速增加, 并且压力分布也比较均匀。这表明随着密封间隙的增大, 气流的沿程阻力损失迅速变小, 在高压的作用下能够以很高的速度顺利的通过密封间隙。

3.2 密封间隙对封严特性的影响

图 5 给出的是在不同的压差下密封间隙对封严特性的影响情况。从图中可以看出, 密封泄漏量随着密封间隙的增大而增大, 当压差比较小时, 泄漏量随密封间隙的增大而缓慢增加, 当压差比较高时, 泄漏量随密封间隙的增大而显著增加。

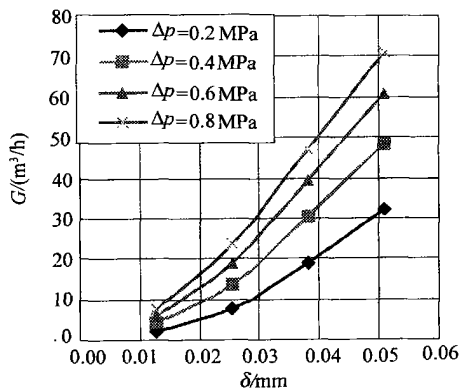


图 5 密封间隙对封严的影响

Fig.5 Affection of clearance on sealing

3.3 压差对封严特性的影响

图 6 给出的是压差对封严特性的影响情况。从图中可以看出, 密封泄漏量与压差近似线性关系, 当密封间隙比较小时, 泄漏量随压差的变化比较缓慢, 当密封间隙比较大时, 泄漏量随压差的变化非常明显。

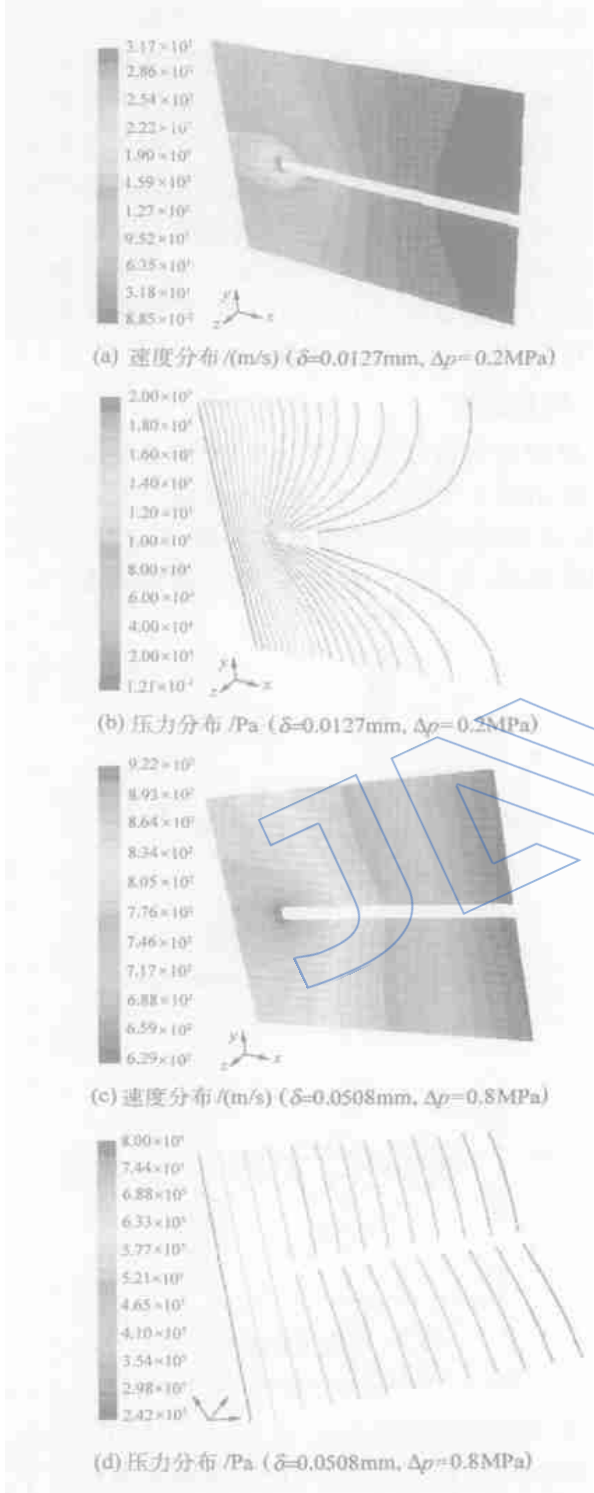


图 4 密封泄漏通道的流场分布

Fig.4 Flow field Distribution of seal leaky passage

因此, 计算模型可简化为图 3 所示的模型, 这样不但给建模工作带来了很大的便利, 也提高了网格

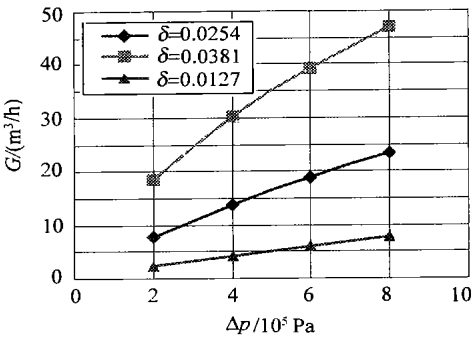


图 6 压差对封严的影响(4 级指尖密封)

Fig. 6 Affection of pressure difference on sealing

3.4 密封级数对封严特性的影响

图 7 给出的是增加高压密封单元级数对封严特性的影响情况。从图中可以看出,密封泄漏量随高压密封单元级数的增加而减少,当密封间隙比较小,级数的增加对密封泄漏的减少比较明显;

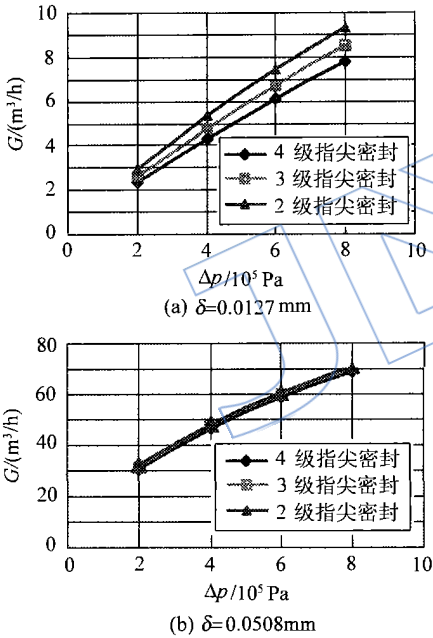


图 7 密封级数对封严的影响

Fig. 7 Affection of pressure difference on sealing

当密封间隙比较大时,级数的增加对泄漏的影响不大。从图 3 可以看出,增加高压密封单元的级数,相当于增加出口 3 前的轴向长度,当密封间隙比较小时,附面层的相对厚度较大,气流通过密封间隙的沿程阻力相对较大;当密封间隙比较大时,附面层的相对厚度较小,气流通过密封间隙的沿程阻力相对较小。因此,高压密封单元级数的增加在小间隙情况下对封严效果较明显,在大间隙情况下对封严效果不明显。在实际应用中,高压密封

单元主要是用来阻挡指尖密封的侧向泄漏,对轴向泄漏也有一定的阻挡作用,如果工程设计上是属于小间隙密封问题,可考虑增加 1~2 级高压密封单元,如果是相对间隙较大的密封问题,就没有必要通过增加高压密封单元的级数来提高封严效果。

3.5 出口 1、出口 2 和出口 3 泄漏流动分析

图 8 为出口 1、出口 2 和出口 3 的泄漏量随压差变化的情况。

从图中可以看出,当密封间隙较小时,出口 2 的泄漏约占总泄漏量的 80%。当压差改变时,出口 2 的泄漏流量所占的比例几乎不发生变化。当密封间隙扩大 3 倍时,随压差的增大,出口 2 的泄漏量明显减少,出口 1 的变化过程则恰好相反,随压差的增大而迅速增加。在这两种情况下,出口 3 的泄漏始终很小,在小间隙情况下,约占 10%,在较大间隙情况下,约占 7%。

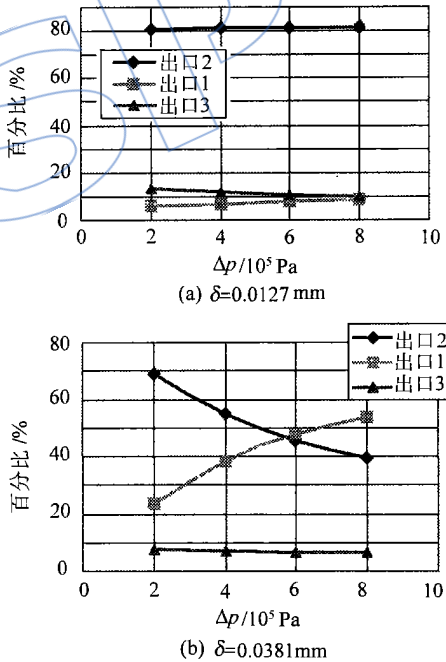


图 8 出口 1、出口 2 和出口 3 的泄漏比较

Fig. 8 Leaky comparison of exit1, exit2 and exit3

产生这种变化的原因主要是由于气体的惯性力与粘性力共同作用的结果。表 1 为低压指尖靴中部位置处的雷诺数。从表 1 中可以看出,当密封间隙较小时,雷诺数很小,虽然随压差的增大雷诺数也增大,但增加的绝对值却不大,当密封间隙增大 3 倍时,雷诺数较小时间隙情况平均增大了 15 倍,而且随压差的增大,雷诺数的增加值也比小时间隙情况增大了很多,这表明当密封间隙增大时,气

表 1 低压指尖中部位置处雷诺数

Table 1 Reynolds number located the mid length of low pressure padded finger

密封间隙 /mm	压差/MPa			
	0.2	0.4	0.6	0.8
0.012 7	3.4	7.7	11.3	15.3
0.038 1	64	119	162	193

体流动的惯性力增长很快, 气体在惯性力的作用下, 沿轴向泄漏增长也很快, 也即从出口 1 的泄漏增长较快。由于出口 3 的泄漏尺寸很小, 沿周向只有 0.4 mm, 所以, 在上述两间隙情况下, 从出口 3 的泄漏也很小。

4 结 论

通过对指尖密封泄漏流动的数值仿真与分析, 可以得到如下结论:

- (1) 压差对指尖密封的泄漏流动有较大的影响。当指尖密封的级数和密封间隙一定时, 泄漏量随压差的增大而增大。
- (2) 密封间隙的大小显著影响泄漏流动。泄漏量随密封间隙的增大而增大, 压差越高, 泄漏越明显。
- (3) 指尖密封的级数影响泄漏流动。当密封间隙较小时, 增加级数能有效降低泄漏, 当密封间隙较大时, 增加级数对泄漏影响很小。
- (4) 在低压差、小密封间隙的指尖密封件中, 出口 1 的泄漏很小, 出口 2 的泄漏量很大, 合理设计出口 2 的结构形式能有效地降低密封泄漏。

参考文献:

[1] Margaret P Proctor, Arun Kumar, Irebert R Delgado. High-

Speed, High-Temperature Finger Seal Test Result [R]. NASA/TM- 2002- 211589, Cleveland, Ohio., 2002.

[2] Bruce M Steinetz, Robert C Hendricks. Advanced Seal Technology Role in Meeting Next Generation Turbine Engine Goals[R]. NASA/TM- 1998- 206961, Cleveland, Ohio., 1998.

[3] Johnson M C, Medlin E G. Laminated Finger Seal with Logarithmic Curvature [P]. US: 5, 108, 116, 1992.

[4] Arora G K, Margaret P P, Steinetz B M, et al. Pressure Balanced, Low Hysteresis, Finger Seal Test Results[R]. 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Los Angeles, California, 1999.

[5] Braun M J, Kudriavtsev V V, Hendricks R C. A Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation of Flow in a Passive-Adaptive Finger Seal[A]. The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC- 9)[C]. Honolulu, Hawaii, 2002.

[6] 陈国定, 吴昊天. 后遮流板结构尺寸对指尖密封性能影响的研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(1): 11~13.

Chen Guoding, Wu Haotian. Research to the Influence of Aft Cover Plate Construction on the Finger Seal Performances[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2004, 15(1): 11~13.

[7] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封型线的力学性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(2): 218~221.

Chen Guoding, Xu Hua, Yu Lie, et al. On Selecting Proper Shape of Finger Seal[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 20(2): 218~221.

[8] 陈国定, 徐华, 虞烈, 等. 指尖密封的迟滞特性分析[J]. 机械工程学报, 2003, 39(5): 121~124.

Chen Guoding, Xu Hua, Yu Lie, et al. Analysis to the Hysteresis of Finger Seal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(5): 121~124.

[9] 陈国定, 苏华, 张永红. 指尖密封轴向布局的变尺度结构研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 488~491.

CHEN Guo-ding, SU Hua, ZHANG Yong-hong. Variable-Dimension Construction in the Axial Arrangement of Finger Seal Mechanism [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 488~491.