

直通式篦齿封严特性的实验研究*

吴丁毅

(西北工业大学航空动力与热力工程系, 西安 710072)

摘 要: 用实验方法研究了直通式直齿和直通式斜齿在不同的齿类厚度与封严间隙比、齿数和流向的条件下, 泄漏量随篦齿前后压力比的变化规律。得到了几个有价值的结论, 提出了计算其泄漏量的经验公式。计算结果与实验数据吻合良好。

主题词: 航空发动机, 压气机, 旋转密封, 迷宫密封件

分类号: V232.4, TH45

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SEAL CHARACTER OF STRAIGHT-THROUGH LABYRINTH

Wu Dingyi

(Dept. of Aeroengine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an, 710072)

Abstract: The influencing factors and correlations for flow parameter of straight-through labyrinth and slant labyrinth are investigated in experiments. The factors include the number and shape of restrictions, ratio of the restriction's thickness to clearance, pressure ratio and flow direction. A number of valuable conclusions have been drawn on the basis of analyses. Empirical expressions for the leakage are formulated. The agreement of calculation with experimental data is good.

Subject terms: Aircraft engine, Air compressor, Rotary sealing, Labyrinth seal

1 引言

我国现役航空发动机主要采用直通式直齿和直通式斜齿的篦齿密封。在计算篦齿泄漏量时, 仍采用仅考虑压比和齿数的简单经验公式, 对提高发动机空气系统计算准确性和保证其高效工作十分不利。本文采用实验的方法, 测量直通式直齿和斜齿在多种几何参数组合下泄漏量随齿前后压比的变化情况, 分析了齿形、齿数、齿尖厚度、间隙和流向对封严特性的影响。提出了考虑多因素的计算篦齿泄漏量经验公式, 可以方便准确地计算出直通式直齿和斜齿的泄漏量。

2 实验装置

实验系统示意图见图1。实验中忽略了转动和三维结构的影响^[1]。实验时测量篦齿上游气流的总温 T_1^* 和总压 p_1^* , 下游气流的总压 p_2^* 以及通过篦齿的流量 $\dot{m}$ 。

实验测量的篦齿结构如图2所示。图2(a)是直通式直齿, 图2(b)是直通式斜齿。齿高 $H=3.0\text{mm}$, 齿距 $B=3.5\text{mm}$, 齿尖厚 $t=0.3\text{mm}$, 扩张角 $\theta=16^\circ$, 斜齿的倾角 $\alpha=50^\circ$ 。根据篦齿

* 收稿日期: 19960530, 修回日期: 19961001, 为航空基金资助项目

流场显示研究的结果选为 50° 。 α 过大封严性能接近直齿, α 过小不能充分利用齿间旋涡消耗动能的作用。由于在篦齿中齿顶节流的作用比齿间涡流对封严的贡献大, 故 t/c 对泄漏的影响比 H/B 要大, 因此实验中 H/B 采用一定的值。根据内部流场的研究, $H/B < 0.5$ 时可以充分发挥齿间涡流在封严中的作用, 但这会导致篦齿结构过大。现役发动机为了避免在此增加重量, 主要靠多齿的节流。本文为了使研究结果具有实用价值, 综合目前常用的结构尺寸确定了试验件的 H 和 B 的尺寸。

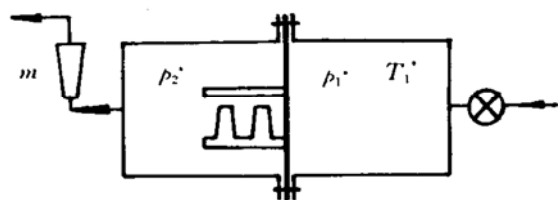


Fig. 1 Test system

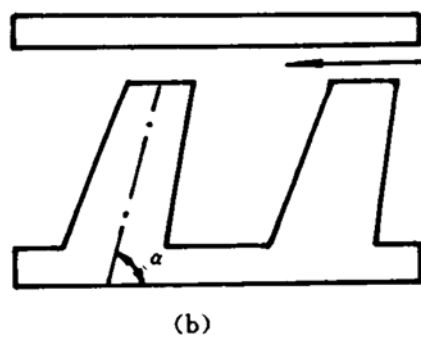
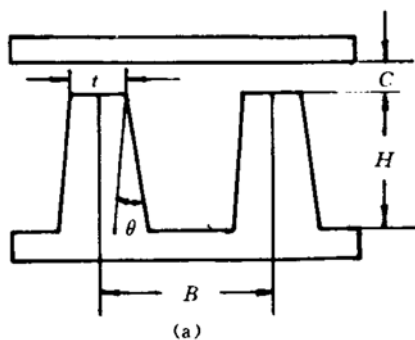


Fig. 2 Labyrinth structure

a. vertical b. Slant

3 实验结果及分析

在实验中主要研究了篦齿前后的压力比 p_1^*/p_2^* 、齿尖厚度与间隙比 t/c 、齿数 N 以及气流方向对封严性能的影响, 并整理成泄漏系数 φ 随上述参数的变化规律。 φ 的定义为

$$\varphi = \dot{m} \sqrt{T_1^*} / (p_1^* A) \quad (1)$$

其中 $A = C \cdot L$, L 是试验件宽度, A 为齿尖处气流流通面积。

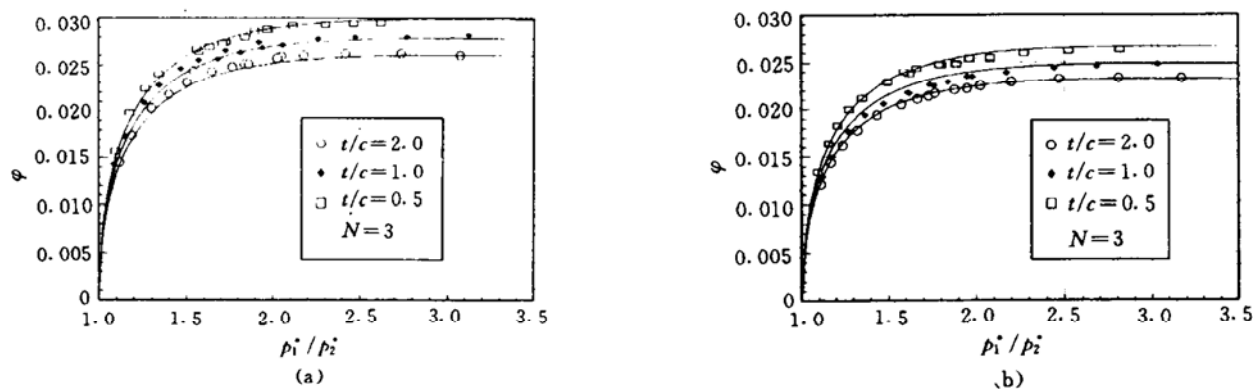
3.1 t/c 的影响

图 3 中的 (a) 和 (b) 分别是直通式直齿和斜齿在不同的 t/c 时, 泄漏系数 φ 随压比的变化情况。篦齿齿数均为 3。图中用圈点符号表示的离散数据是实验结果。连续的实曲线是用本文提出的经验公式的计算结果(下同)。

从图中我们可以看出, 随着压比由 1 逐渐增大, 泄漏量也逐渐增大。在 p_1^*/p_2^* 为 1~2 的区域里 φ 值增加很快, 当 p_1^*/p_2^* 超过 2 以后 φ 变化缓慢趋近定值。随着间隙 c 的增加, 泄漏系数 φ 随之增加, t/c 减小一半, φ 大约增加 7%。由 φ 的定义式 (1) 可以看出, 间隙 c 的变化对泄漏量 $\dot{m}$ 的影响很大, $\dot{m}$ 的变化比 c 还要快。这正是直通式篦齿的弱点, 封严性能随间隙的变化过于敏感。

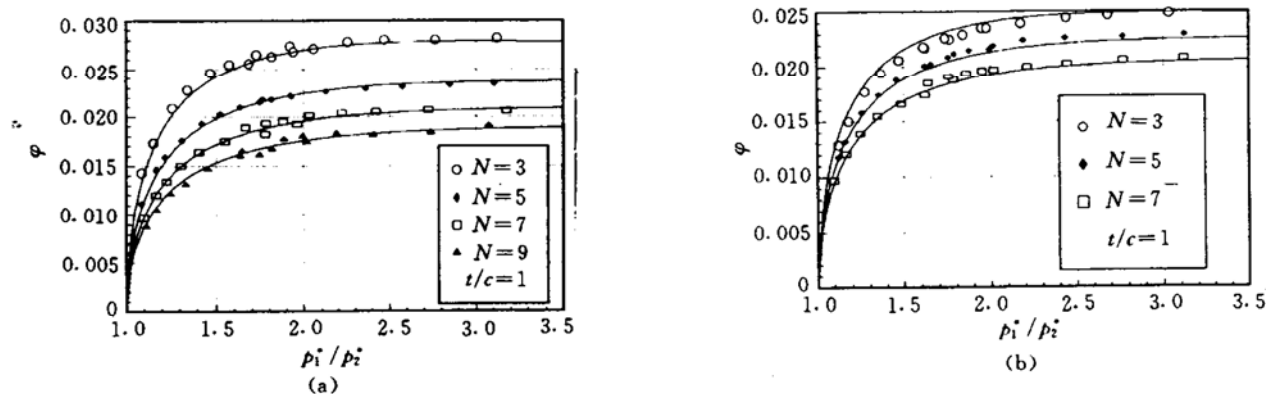
3.2 齿数 N 的影响

图 4 是在 $t/c = 1$ 时两种篦齿在不同的齿数 N 下, φ 随压比的变化情况。可以看出随着齿数 N 的增加泄漏系数 φ 减小, 这就是篦齿多次节流的效果。在齿数较少时, 这种效果很明显; 当齿数较多以后再用增加齿数来提高封严性能效果就不理想了。根据本文的研究认为直通式

Fig. 3 Effect of t/c on ϕ

a. Vertical b. Slant

直齿齿数超过 8、直通式斜齿齿数超过 6 以后,再增加齿数对封严性能影响不明显。当然在实际结构中由于尺寸的限制也不可能选用这么大的齿数,而应改用新型高效的篦齿结构。

Fig. 4 Effect of N on ϕ

a. Vertical b. Slant

3.3 齿型及流向的影响

图 5 是齿型和流向对泄漏系数 ϕ 的影响情况。由图 5(a)可以看到在 $t/c=1, N=3$ 时斜齿的封严效果明显好于直齿,这是由于斜齿的齿间形状使得更多的气体卷入旋涡中造成动能损失增加,泄漏量减少。当 $N=5$, 仍然是 $t/c=1$ 时,见图 5(b),两种篦齿的封严效果差别减小。这说明随着齿数增加,齿顶节流在篦齿封严中的作用逐渐增大,而齿间涡流造成的差别逐步消失。所以当齿数超过 5 以后采用直齿或斜齿的封严效果差别不大。

从图 5(a)中还可以看到当气流反向流过斜齿时,参见图 2(b),封严效果比直齿还差。同斜齿的封严性能好于直齿的原因相似,当气流反向流过斜齿时卷入齿间的气流比直齿时还要少,更多的气体直接冲进下一个篦齿,所以泄漏量增加。因此在流向没有确定或流向可能改变的封严位置上不宜采用直通式斜齿。

4 计算公式

本文利用大量的实验数据在文献[2]的理论性公式的基础上,考虑了 t/c 、齿数和齿型等因素的影响提出了计算直通式直齿和斜齿的泄漏系数 ϕ 的经验公式。图 3、图 4 中的曲线即为

(下转第 97 页)

参 考 文 献

- 1 Krier H, Tien J S, Sirignano W A, et al. Nonsteady burning phenomena of solid propellants: theory and experiments. AIAA J, 1968, 8(12): 2200~2207
- 2 Culick F E C. Some recent results for nonlinear acoustics in combustion chambers. AIAA J, 1994, 32(1): 146~169
- 3 De Luca L. Nonlinear burning stability theory of heterogeneous thin flames. Eighteenth Symposium on Combustion Proceedings, 1981: 1439~1450
- 4 Kooker D E, Nelson C W. Numerical solution of solid propellant transient combustion. ASME J of Heat Transfer, 1979, 101: 359~364
- 5 王峻晔, 张佳心, 桑秉诚. 压力变化速率对固体推进剂燃烧的影响. 兵工学报, 1991(3): 84~89

(上接第 81 页)

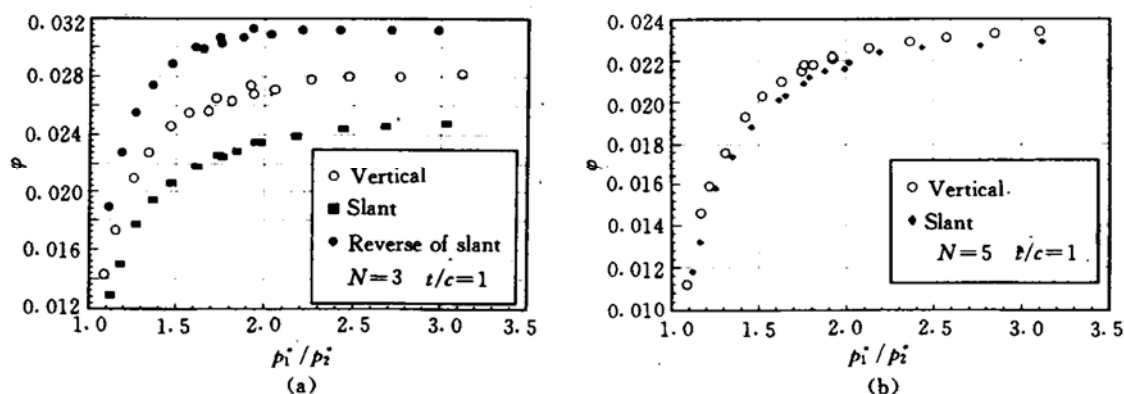


Fig. 5 Effect of Shape and direction

a. Vertical b. Slant

$$\varphi = k \cdot \left(\frac{t}{c}\right)^{-0.1} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - a(N-1)/N}} \cdot \sqrt{\frac{1 - (p_1^*/p_2^*)^{-2}}{N + \ln(p_1^*/p_2^*)}} \quad (2)$$

直齿: $k=0.053, a=0.33, N \leq 9$; 斜齿: $k=0.039, a=0.7, N \leq 7$

公式(2)的计算结果,与实验数据的符合程度令人满意。

参 考 文 献

- 1 Stocker H L. Determining and improving labyrinth seal performance in current and advanced high performance gas turbines. AGARD CP-237, Seal Technology in Gas Turbine Engines, 1987
- 2 塔鲁达纳夫斯基 K. 非接触密封. 北京:机械工业出版社, 1986