

文章编号:1000-8055(2011)03-0558-05

# 齿间浅槽结构对直通篦齿封严特性影响的实验

纪国剑<sup>1</sup>, 吉洪湖<sup>2</sup>, 王政伟<sup>1</sup>

(1. 常州大学 机械与能源工程学院, 常州 213016;  
2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 在早期研究的结果上,提出了一种齿间浅槽结构的直通齿衬套,即在与篦齿齿腔正对的衬套上加工制成浅槽.这种齿间浅槽破坏了壁面射流附面层的轴向连续性,导致射流流经浅槽后向篦齿齿腔发生小角度偏转,这样能有效地降低直通篦齿的透气效应,进而降低泄漏量.实验结果表明,相比于传统的光滑衬套,浅槽泄漏系数显著降低,其中矩形浅槽下降 15%,平行四边形浅槽下降 30%,封严性能大大提高,这进一步说明迎来流方向,较小的迎风角有利于射流偏转,而当射流离开浅槽时,较大的开槽角度增加了射流的流动阻力,更利于射流的偏转.

**关 键 词:** 直通篦齿; 衬套; 壁面射流; 齿间浅槽; 泄漏系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

## Experiments of leakage effects of rub-grooves on straight-through labyrinth seals

JI Guo-jian<sup>1</sup>, JI Hong-hu<sup>2</sup>, WANG Zheng-wei<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Energy Engineering,  
Changzhou University, Changzhou 213016, China;

2. College of Energy and Power Engineering,  
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Based on early studies, a straight-through labyrinth seal was developed, which has a bush with a rub-groove machined opposite the teeth cavity. The rub-groove manufactured on the smooth bush opposite to the tooth cavity destroys the continuity of the wall jet boundary layer, which lead to the jet flow change it direction and greatly improve sealing effect. The experimental studies show that it has a better sealing effect. The leakage coefficient of labyrinth seal with the rectangle rub-grooves is decreased 15% and the parallelogram rub-grooves 30%. Little windward angle of rub-grooves leads to jet deflection and big leeward angle of rub-grooves is beneficial to increase the resistance of the jet and also leads to jet deflection.

**Key words:** straight-through labyrinth; bush; wall jet; rub-groove; leakage coefficient

篦齿结构在运行过程中由于部件温度的变化,篦齿盘和衬套的热变形率不同以及篦齿盘与衬套的相对轴向和径向位移,往往会造成篦齿与衬套的摩擦,并在衬套内环面上形成一道道磨损

槽,磨损槽的形状与篦齿的形状、篦齿盘与衬套轴向和径向的相对位移量有关,磨损槽与篦齿组合关系的变化与篦齿封严性能的关系对封严性能影响很大<sup>[1-3]</sup>.

收稿日期:2010-08-15; 修订日期:2010-11-30

作者简介:纪国剑(1980—),男,江苏镇江人,讲师,博士,主要从事动态密封与余热利用方面的研究.

此外,在研究篦齿齿腔射流扩散特性时,发现直通篦齿透气效应较高<sup>[4-5]</sup>,不利于封严.为了有效改善直通篦齿的封严特性,本文设计了一种齿间浅槽结构衬套,即预先在静止衬套上加工制成环形浅槽,该槽的位置与齿腔正对,目的是想通过衬套壁面上结构的细微变化,控制衬套壁面附近的流动结构,从而改变齿腔内射流的扩散特性,降低透气效应.

为了能很好的区分这两种结构,根据结构上的不同,定义因齿尖磨损导致的凹槽为齿尖磨损槽,而预先在衬套上加工制成,并与齿腔正对的凹槽为齿间槽.齿间浅槽衬套是笔者设想的一种的静止衬套结构,即在静止衬套上预先加工制成环形槽,与传统齿尖磨损槽不同的是这类浅槽与齿腔相对,目的就是为对节流后形成的壁面射流的扩散起到干扰作用,以增加流阻减小透气效应,从而降低泄漏.

本文主要实验研究了不同压比和转速下不同齿间浅槽篦齿结构的泄漏特性,初步研究了这类环形槽对直通篦齿封严特性的影响.

## 1 物理模型

### 1.1 物理模型

图1给出了篦齿结构与齿间浅槽结构示意图,虚线表示传统齿尖磨损槽的位置.主要结构参数有节流间隙宽度 $c$ ,节流间隙长度(或称齿尖宽度) $t$ ,篦齿直径 $D$ , $x$ 为齿间槽与上一节篦齿之间的轴向距离, $a$ 和 $b$ 为齿间槽的宽度和深度, $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 为开槽角度.

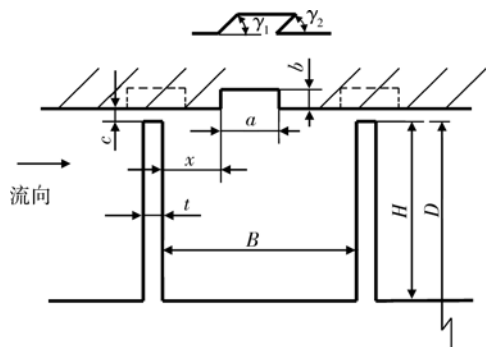


图1 篦齿封严齿间浅槽结构示意图

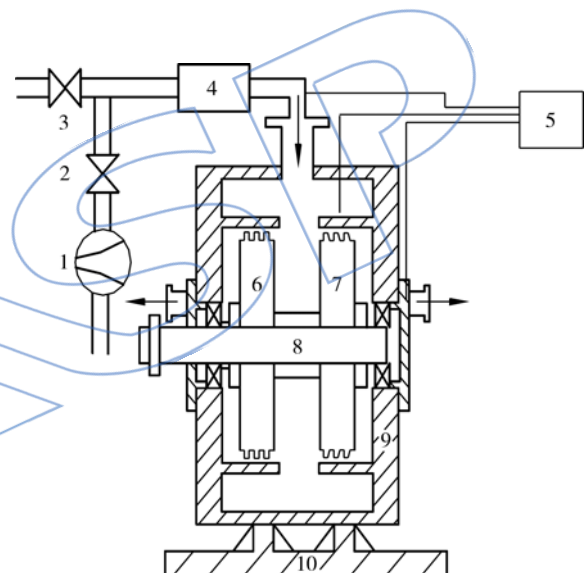
Fig. 1 Structure of rub-grooves in the bush of labyrinth seal

由于鲜有类似的研究资料,在选择齿间槽结构时,主要从增加篦齿内部射流扩散的角度出发,以破坏射流的轴向连续性并降低透气效应为设计

原则<sup>[6]</sup>,设计了矩形浅槽和平行四边形浅槽两类齿间槽结构,在选择齿间槽尺寸时,参阅文献<sup>[7-8]</sup>中齿尖磨损槽结构尺寸,并考虑了齿尖磨损槽的影响和齿腔宽度的限制<sup>[9-10]</sup>.

### 1.2 实验台及实验件

自行设计了篦齿封严实验台<sup>[11]</sup>,该实验台为单轴、桶式对称结构,这样的设计主要是为了消除或大大减小轴承上的轴向力.另外实验台还可同时对两组实验件进行实验.图2是实验系统的示意图,主要包括压缩机、实验段以及测量系统三部分.实验测量数据主要包括进口总压、静压、出口静压、间隙流量、进出口总温等.实验压比在1.6到3之间变化,篦齿盘旋转速度在0~2700 r/min之间变化.



1 压缩机; 2 控制阀; 3 旁路; 4 稳压腔; 5 数据采集;  
6 对称直齿; 7 梯形直齿; 8 主轴; 9 腔体; 10 底座

图2 篦齿封严实验系统示意图

Fig. 2 Experiment system of labyrinth seal

实验篦齿盘结构如图3所示.篦齿盘直径 $D$ 为191.3 mm,节流间隙宽度 $c$ 和节流间隙长度 $t$ 分别为0.25 mm和0.3 mm.篦齿为对称直齿,齿数为6,前倾角 $\alpha$ 和后倾角 $\beta$ 均为 $7^\circ$ ,齿腔深度 $H$ 和宽度 $B$ 分别为3 mm和2.7 mm.图4为篦齿件实物图.

根据前期数值计算结果<sup>[12]</sup>,选择了两种带有齿间槽结构的衬套进行研究,并与光滑衬套结果进行了对比.表1给出了衬套实验件结构参数,B1为光滑衬套,B2为矩形浅槽,B3为平行四边形浅槽,浅槽的开槽角度 $\gamma_1$ 和 $\gamma_2$ 相同,浅槽均与篦齿齿腔正对.

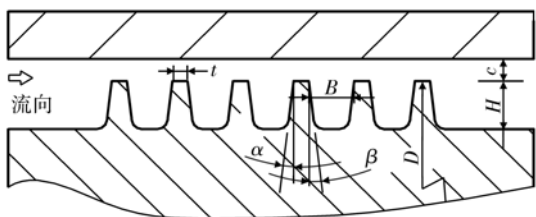


图3 篦齿封严结构

Fig. 3 Structure of the labyrinth seal



图4 篦齿盘实物

Fig. 4 Photo of the labyrinth seal

表1 齿间浅槽实验件结构参数

Table 1 Structure parameters of the rub-grooves

| 实验件 | 槽宽/mm | 槽深/mm | 倾角/(°) | 轴向位置 $x/B$ |
|-----|-------|-------|--------|------------|
| B1  | 0     | 0     | 0      | 0          |
| B2  | 1.5   | 0.3   | 90     | 0.33       |
| B3  | 1.5   | 0.3   | 45     | 0.33       |

图5为平行四边形浅槽B3实验件实物图, 篦齿选用直通齿L1. 为便于加工, 实验件齿间槽宽度在早期的计算基础上适当放大.



图5 实验件B3齿间槽局部图

Fig. 5 Partial photo of the bush B3

在封严结构中, 以泄漏系数作为评价封严性能的参数, 其定义为

$$\varphi = \dot{m} \sqrt{T_0} / (p_0 A) \quad (1)$$

式中  $\dot{m}$  为流过篦齿缝隙的泄漏量,  $T_0$  和  $p_0$  分别为篦齿缝隙进口总温和总压,  $A$  为齿尖处气流流通面积,  $A = c\pi D$ .

## 2 结果分析

### 2.1 进出口压比对泄漏特性的影响

为了充分得到进口总压对泄漏特性的影响, 本文对直通齿L1平行四边形浅槽B3衬套组合结构的封严特性进行了细致的实验, 得到了16组不同压比下的泄漏量. 图6给出篦齿前后腔压比与泄漏量的关系曲线. 压比在1.6到3之间变化. 由图可以看出, 提高篦齿前后腔压比, 泄漏量线性增加, 这一点与无槽衬套结构是相同的. 图7给出了齿间槽衬套结构下压比与泄漏系数的关系曲线. 由图可以看出, 随着进出口压比的增加, 泄漏系数是增加的, 只是在低压比阶段, 泄漏系数随压比的增加增长得较快, 继续增加压比到2.7附近时, 泄漏系数基本不再变化, 这与数值分析的结果是一致的<sup>[3]</sup>.

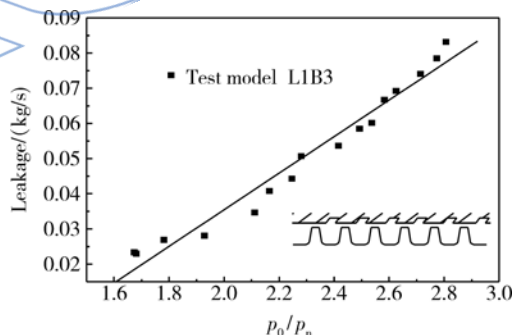


图6 模型L1B3的压比与泄漏量关系

Fig. 6 Variations of the leakage with pressure ratio

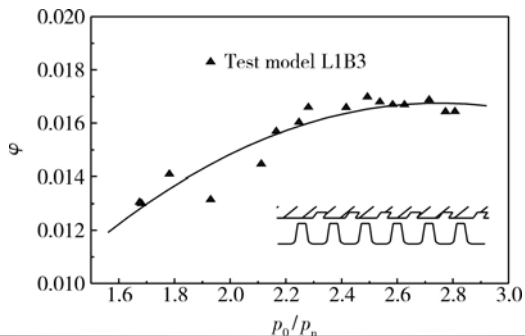


图7 模型L1B3的压比与泄漏系数关系

Fig. 7 Variations of the leakage coefficient with pressure ratio

## 2.2 转速对矩形浅槽衬套泄漏特性的影响

图8给出了两种压比下转速对篦齿矩形浅槽衬套 L1B3 组合结构封严特性的影响曲线. 由图可见, 篦齿盘转速在  $0 \sim 2700 \text{ r/min}$  内变化时, 改变篦齿盘的旋转速度, 泄漏系数基本不变, 这主要是低转速时, 齿尖流体切向速度比轴向速度小很多, 流体方向沿轴向改变不大, 流动阻力基本不变, 故泄漏系数基本不变. 这一点与直通齿-光滑衬套组合结构的结论是一致的, 说明低转速对这类带浅槽衬套结构的泄漏特性影响不大.

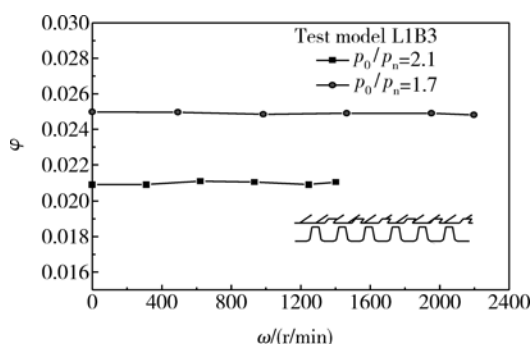


图8 旋转对矩形浅槽衬套泄漏特性的影响曲线

Fig. 8 Effect of the rotating speed on the sealing characteristic of rectangle rub-grooves in bush

## 2.3 与无槽结构封严特性的比较

图9为直通齿 L1 在不同衬套组合结构下压比与泄漏系数的关系曲线. 由图可以明显看出, 与篦齿-光滑衬套 L1B1 组合结构相比较, 篦齿-齿间浅槽衬套结构的泄漏系数大大降低, 矩形浅槽 B2 衬套泄漏系数降低了约 15%, 平行四边形浅槽 B3 衬套泄漏系数降低了 30%, 这与前期的计算

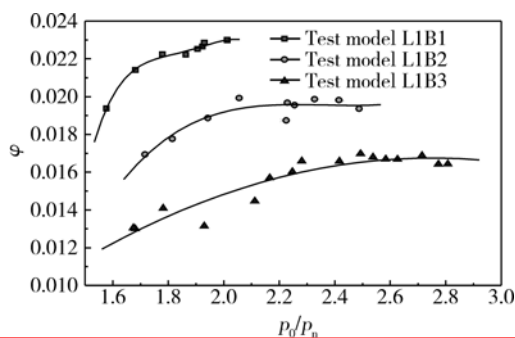


图9 不同篦齿衬套组合结构下压比与泄漏系数的关系

Fig. 9 Effect of different grooves on the sealing characteristic with pressure ratio

结果基本相符, 也证明了本文的设想, 即在齿间加工制成的齿间浅槽结构, 能明显改变节流后高速射流的运动方向, 增加流动阻力, 从而降低直通齿的透气效应, 大大提高封严性能. 同时, 迎着来流方向, 较小的浅槽倾角有利于射流向浅槽内偏转, 当射流离开浅槽时, 较小的倾角可以起到阻挡作用, 增加流动阻力, 同时利于射流向齿腔内偏转.

## 3 结 论

1) 在直通篦齿与齿腔正对的静止衬套上预先加工制成环形浅槽, 封严性能显著提高. 这是因为齿间浅槽破坏了壁面射流附面层的轴向连续性, 射流在流经浅槽时会朝齿腔内发生小角度偏转, 从而大大降低了透气效应,

2) 在本文的研究范围内, 相比于光滑衬套, 齿间浅槽结构, 矩形浅槽泄漏系数下降了 15%, 平行四边形浅槽泄漏系数下降了约 30%, 封严性能显著提高.

3) 齿间槽的开槽角度对射流偏转影响较大, 相比于齿间矩形浅槽, 齿间平行四边形浅槽衬套结构更利于射流的偏转, 封严性能也大大提高.

## 参考文献:

- [1] Denecke J, Schramm V, Kim S, et al. Influence of rub-grooves on labyrinth seal leakage[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 387-393.
- [2] Rhode D L, Allen B F. Measurement and visualization of leakage effects of rounded teeth tips and rub-grooves on stepped labyrinths[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(3): 604-611.
- [3] Rhode D L, Adams R G. Rub-groove width and depth effects on flow predictions for straight-through labyrinth seals[J]. Journal of Tribology, Transaction of the ASME, 2004, 126(4): 781-787.
- [4] Egli A. The leakage of gases through narrow channels[J]. Journal of Applied Mechanics, 1937, 4(2): 63-68.
- [5] Vermes G. A fluid mechanics approach to the labyrinth seal leakage problem[J]. Journal of Engineering for Power, 1961, 83(2): 161-169.
- [6] Rajaratnam N. Turbulent jets[M]. Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [7] Stocker H L, Cox D M. Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seals with solid-smooth, abrasible, and honeycomb lands[R]. NASA CR-135307, 1977.
- [8] Rhode D L. Relatively axial displacement leakage effects on straight through labyrinth seals with rub grooves[R]. AIAA-2004-3716, 2004.
- [9] 刘大响. 航空发动机设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社

- 社,2000:300-302.
- [10] Rhode D J, Johnson J W, Broussard D H. Flow visualization and leakage measurements of stepped labyrinth seals Part 1: annular groove [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(4): 839-843.
- [11] 纪国剑, 吉洪湖. 直通篦齿封严结构压损规律和临界特性的研究[J]. *航空动力学报*, 2008, 28(3): 415-420.
- JI Guojian, JI Honghu. Numerical and experimental investigation of pressure loss and critical sealing characteristics of straight-through labyrinth seals [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 28(3): 415-420. (in Chinese)
- [12] 纪国剑, 吉洪湖, 白花蕾. 齿间环形凹槽结构对直通篦齿封严特性影响的数值研究[J]. *流体机械*, 2007, 35(12): 21-24.
- JI Guojian, JI Honghu, BAI Hualei. Numerical investigation of leakage effect of rub groove on the straight-through labyrinth seal [J]. *Fluid Machinery*, 2007, 35(12): 21-24. (in Chinese)