

文章编号:1000-8055(2011)12-2655-06

直通篦齿蜂窝封严结构的风阻特性试验

纪国剑^{1,2}, 吉洪湖¹, 黄云霞¹, 帅海山¹, 陆海鹰³, 王海³

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016;

3. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 试验研究了直通直齿和直通斜齿与蜂窝衬套和光滑衬套 4 种组合的三齿两腔封严结构的风阻特性, 得到了风阻特性随转速、压比、衬套和齿形结构的变化规律。结果表明: 4 种组合封严结构在低转速时风阻生热基本都可以忽略, 转速在 3000 r/min 到 6000 r/min 之间变化时风阻生热引起的流体总温升随转速增大; 采用光滑衬套时, 泄漏流体流至首级齿腔处的总温升占进出口总温升比例维持在 45% 以上, 而蜂窝衬套对气流黏滞作用大, 低压比时首级齿腔总温升占进出口总温升的比例仅有 20% 左右, 继续增加压比, 首级齿腔处的总温升比例由 20% 增加到 50% 左右后保持不变; 相同衬套时, 斜齿比直齿具有较长的齿表面曲线长度, 从而具有较高的风阻生热。

关 键 词: 直通篦齿; 蜂窝衬套; 风阻生热; 总温; 旋转

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment investigation of windage heating on straight-through labyrinth seals with honeycomb bush

JI Guo-jian^{1,2}, JI Hong-hu¹, HUANG Yun-xia¹, SHUAI Hai-shan¹,
LU Hai-ying³, WANG Hai³

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Petroleum Engineering,
Changzhou University, Changzhou Jiangsu 213016, China;

3. Shenyang Aeroengine Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Experiment investigation of windage heat on straight tooth and slant tooth of labyrinth seals composed of three teeth and two cavities with honeycomb bush and smooth bush had been made to study the effect of rotating speed and the pressure ratio of inlet to outlet and structure of tooth and bush. The results show that the total temperature of leakage fluid caused by windage heat may be neglected at low rotor speed and is increased with the increasing rotation speed between 3000 r/min and 6000 r/min. The total temperature ratio of first tooth to all teeth is more than 50% with smooth bush and is only 20% with honeycomb bush under low pressure ratio and enhanced to 50% with the increase of the pressure ratio. The straight tooth show increased windage heat when compared to slant tooth with the same bush due to the larger extension length of seal surface curve.

收稿日期: 2011-09-09; **修订日期:** 2011-11-03

基金项目: 江苏省高校自然科学基金(11KJB470001)

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

Key words: labyrinth seal; honeycomb bush; windage heat; total temperature; rotation

先进的机械设计和热分析技术使封严间隙可以被设计的更小,高速旋转可以减小泄漏是设计者们所乐见的^[1].但是同时也带来了更强的能量耗散,即转盘与泄漏气体摩擦生热及泄漏气体之间的黏性生热造成泄漏气流温度增加,使篦齿封严的热负荷加重,并且对下游被冷却部件非常不利.通用(GE)公司曾发现旋转造成的气流风阻温升可导致封严齿发生蠕变,必须有专门的冷却气来冷却^[2].可见,风阻温升会增加发动机的设计和制造成本.

McGreehan W 和 Ko S^[3]首次从热力学定律的功热转化角度出发,提出气流温升的热量来源于转子对气流所做的功,并考虑进口预旋比、转速和流量等因素,总结归纳了风阻引起的总温升的经验公式. Millward J 和 Edwards M^[4]通过试验测定不同齿型和不同静子衬套的篦齿封严的风阻效应,指出风阻生热与齿形表面曲线长度成正比,蜂窝衬套表面摩擦阻力比光滑衬套高,风阻生热增加约为光滑衬套的 1.15 倍. Stocker C^[5]使用测扭矩法得到了直通式和台阶式篦齿封严动力损失,发现蜂窝衬套会使动力损失增加 13% 左右.

Nayak K C 等^[6-7]研究了发动机过渡状态齿尖形状和静止蜂窝衬套磨损槽结构等对台阶篦齿蜂窝结构风阻生热的影响.相对于锐边齿尖结构,齿尖倒角结构改变了齿尖节流射流结构,倒角越大,风阻效应越弱,风阻生热最大可降低 54%. 国内,呼艳丽等人^[8]对台阶篦齿风阻温升进行了初步的试验研究,认为温升由篦齿盘面旋转摩擦和通道内气体黏性摩擦生热两部分组成,低压比时后者基本可忽略.

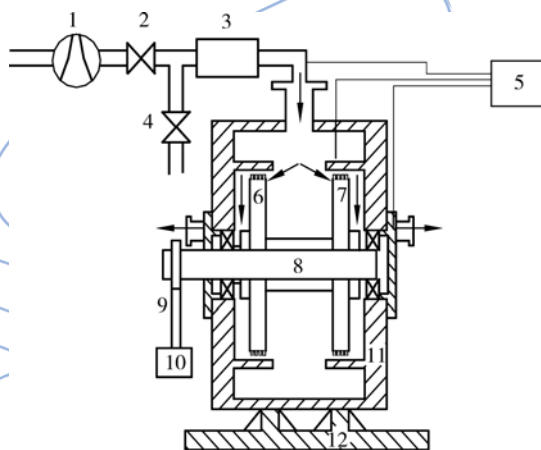
如能保证精度,使用经验关系式计算风阻功或泄漏气流的总温升将比计算流体动力学(CFD)模拟节省大量的时间和成本.但遗憾的是不同研究者提出的经验公式或试验数据往往相差很大^[3,4,9-12].为此,本文以直通篦齿蜂窝衬套封严结构为研究对象,试验研究了转速、进出口压比、衬套和齿形结构等对篦齿封严风阻特性的影响,对工程设计有一定的指导意义.

1 试验装置与数据处理

1.1 试验台

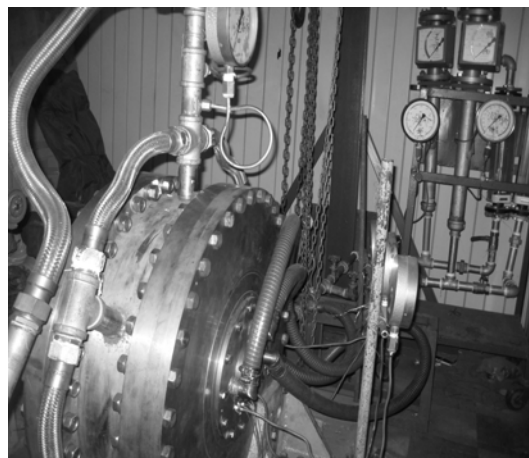
图 1(a)和图 1(b)分别为试验系统的示意图

和试验台实物照片.试验系统^[13]包括压缩机、旋转试验台以及测量系统三部分,旋转试验台为筒体轴对称结构,可抵消轴承受力,同时可对两组试验件进行研究.旋转试验台为自行设计加工,主要包括篦齿封严组件、腔体、主轴、轴承座、轴承、底座等部分.通过试验台前端的调节阀和旁路调节压缩空气的流量和压力.气流沿旋转试验台周向均布的 5 个入口进入试验台内部副稳压腔,再经左右篦齿封严试验件向低压腔泄漏.试验传动方式为皮带传动,传动比为 2:1,通过调节交流电频率改变电机的转速,从而改变试验转盘的转速,试验台最大转速为 6 000 r/min.



1 压缩机; 2 控制阀; 3 稳压腔; 4 旁路; 5 数据采集;
6 直通直齿蜂窝衬套; 7 直通斜齿光滑衬套; 8 主轴;
9 皮带; 10 电机及变频器; 11 腔体; 12 底座

(a) 篦齿封严试验系统图



(b) 篦齿旋转试验台实物照片

图 1 篦齿试验系统示意图和实物照片

Fig. 1 System and photo of experiment rig for labyrinth seal

1.2 试验件与试验内容

试验共研究了 4 种封严结构的风阻特性,即直通斜齿蜂窝衬套、直通直齿光滑衬套、直通斜齿光滑衬套和直通直齿蜂窝衬套组合结构,图 2(a)和图 2(b)分别给出了前两种组合封严的结构简图,其中蜂窝衬套芯格直径为 0.8 mm,蜂窝厚度为 0.1 mm,蜂窝深度为 5 mm. 试验台装配时,通过衬套夹具微调篦齿盘与衬套的同心率,以满足试验要求,封严间隙则通过塞尺实测. 由于篦齿盘旋转引起的径向拉伸和热膨胀可以忽略,故在数据处理时采用静止状态下实测的封严间隙.

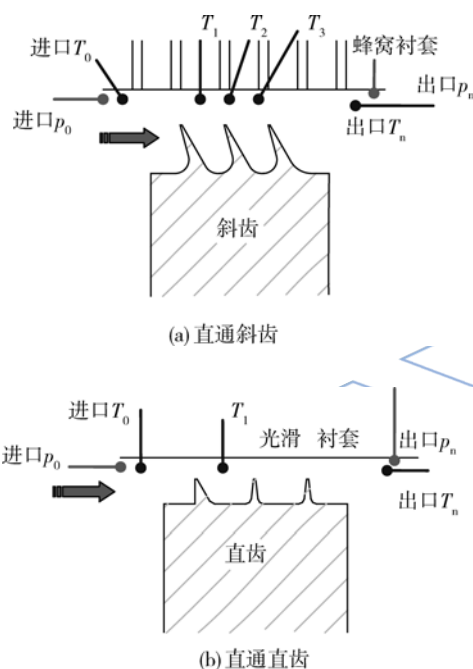


图 2 篦齿结构及压力、温度测点布置示意图
Fig. 2 Structure and the pressure and temperature tap location of labyrinth seal

1.3 数据采集

根据试验台气路组成和试验的需要,试验数据采集包括 4 套测量系统,即压力测量、温度测量、流量测量和转速测量.

进出口压力采用皮托管引压测量,出口静压直接采用精密压力表测量,精度等级为 0.4. 温度采用 T 型铠装热电偶测量,精度为 ± 0.1 K. 图 2 也给出了试验段压力及温度测点布置. 其中蜂窝衬套试验段布置 2 个压力和 5 个温度测点,光滑衬套试验段布置 2 个压力和 3 个温度测点.

由于试验台两侧封严件结构不同,两侧的泄漏量也所有不同,泄漏量由布置在封严件两侧出口管路上的流量计测量. 此外,流量计进口前端也

设置了温度和压力测点,用以修正流量. 考虑到气体压力和流量范围较大,选用有较高耐压能力和大量程的金属浮子流量计,量程在 $40 \sim 400 \text{ m}^3/\text{h}$,最大承压 0.8 MPa,精度等级 1.0.

转速采用 HIOKI3402 型光电式转速计进行测量,量程为 $30 \sim 20000 \text{ r/min}$,精度为 $\pm 1 \text{ r/min}$.

1.4 数据处理

风阻生热由篦齿盘旋转时表面与泄漏气体摩擦生热及泄漏气体之间的黏性生热组成. 通过试验分析工质流过篦齿后的总温变化,并采用风阻系数来评价风阻特性^[9],风阻系数定义如下式:

$$\sigma = 2c_p \Delta T_{0-n} / U^2$$

式中 ΔT_{0-n} 为进出口流体的总温升(K), c_p 为比定压热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), U 为篦齿盘齿尖周向线速度(m/s).

2 结果分析

2.1 转速对总温升的影响

图 3 给出了压比为 1.12 时篦齿蜂窝衬套组合结构各测点相对于进口气流总温升的变化曲

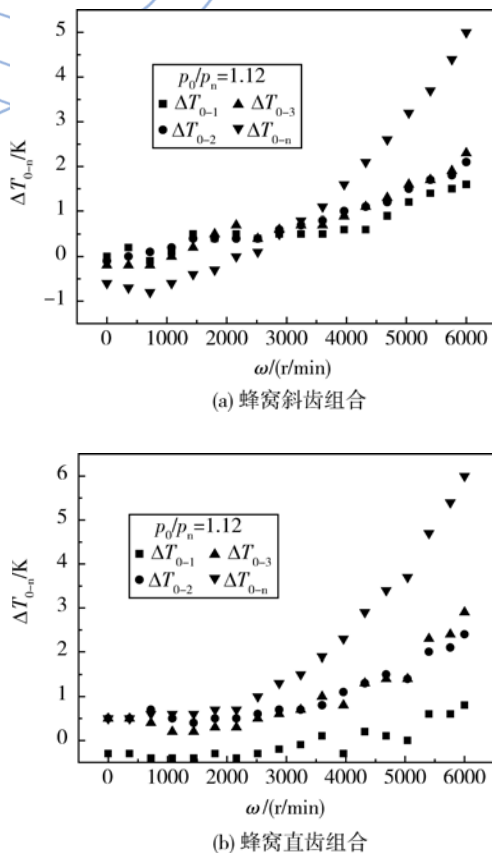


图 3 篦齿-蜂窝衬套气流总温升随转速变化
Fig. 3 Effect of rotor speed on the windage heat of labyrinth seal with honeycomb bush

线,其他压比下的温升曲线与此相似.由图可见,转速在3000 r/min以下变化时,齿腔温度和出口气流总温升很小.主要原因是转速较低时,转盘做功较小,风阻生热较少,同时由于衬套和篦齿的换热作用,抵消了风阻生热,故低转速时温升基本可以忽略.转速在3000 r/min以上时,转盘对泄漏气体做功量迅速上升,转速每提高360 r/min,出口总温升增加幅度逐渐增大.

图4给出了4种压比下,转速在3000 r/min

以上变化时,各级齿腔处温升与进出口总温升的比例曲线.由图可见,随着压比的增加,前两级齿腔处气流总温升的比例逐渐增加.低压比时,前两节篦齿引起的总温升很小,仅占20%左右,如图4(a)所示.增加压比,比例从20%增加到50%以上,同时,最后一级齿腔处的总温升比例由80%下降到50%甚至更低,如图4(b)~图4(d)所示.光滑衬套总温升曲线变化规律与蜂窝衬套组合结构类似.

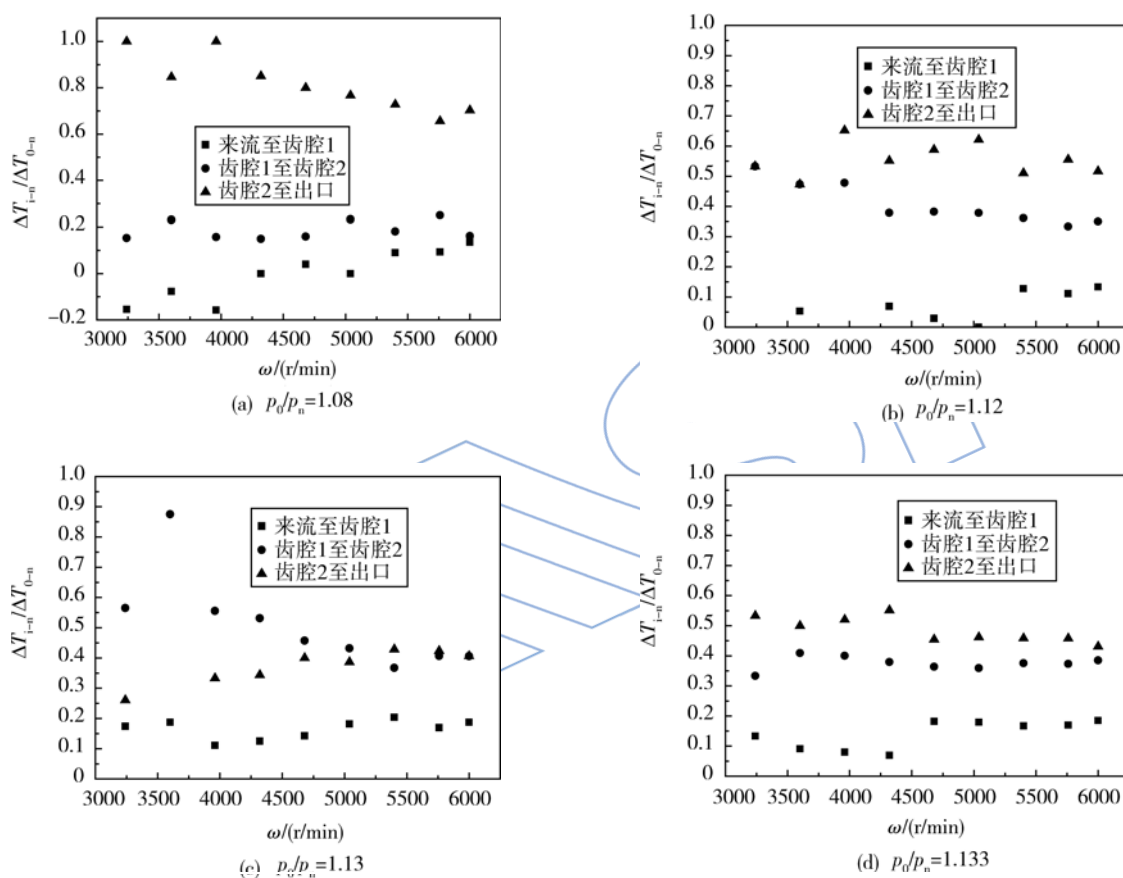


图4 蜂窝衬套篦齿组合结构各齿腔总温升百分比

Fig. 4 Total temperature distribuite of labyrinth seal with honeycomb bush

图5给出了篦齿-光滑衬套组合结构气流流至首级篦齿齿腔总温升与进出口总温升比例曲线.不同压比下,转速在3000 r/min以上变化时,总温升比例趋于稳定.其中光滑衬套直齿组合结构在首级齿腔处的总温升比例随压比增加略有增加,但基本稳定在50%左右;而光滑衬套斜齿组合结构总温升比例在45%~70%之间变化.这一点与蜂窝衬套有明显区别,主要由于衬套表面摩擦因数不同,进一步导致沿程气流的旋转比增加程度,即流体周向速度与转盘周向速度的比值有所区别.

对于光滑衬套,流体在黏性作用下随转盘旋

转,当流体向下节篦齿流动时,已经具备一定的周向速度,越往下游,流体的周向速度越大,流体与转盘的周向相对速度减小,即气流旋转比增大,故风阻摩擦生热有所减小,第一级齿腔处气流总温升约占50%.对于蜂窝结构,衬套表面摩擦因数较大,流体周向运动阻力增加,有效减小了泄漏流体的周向速度的增加,气流旋转比缓慢增加,气流温升的50%位置向下游移动.增加压比,泄漏量增加,且流体轴向速度增加,气体在间隙内流动时间缩短,篦齿周向速度作用减弱,风阻效应减弱,故首级齿腔处的气流总温升比例继续增加.

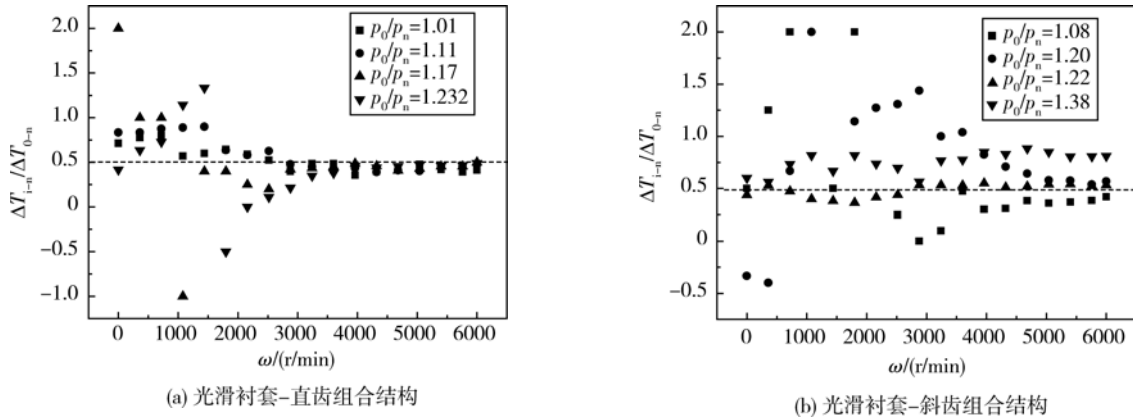


图 5 光滑衬套篦齿组合首级篦齿腔总温升百分比

Fig. 5 Total temperature ratio of first tooth to all tooth with smooth bush

2.2 齿形结构对风阻特性影响

图 6 为同一压比同一衬套下,齿形结构对风阻系数的影响.对于光滑衬套结构,斜齿要比直齿的风阻系数略高,主要原因是风阻生热主要与齿形表面有关,由于斜齿齿腔较深,篦齿表面曲线长度要高于直齿,故风阻系数略高于直齿.对于蜂窝衬套结构,斜齿与直齿的风阻系数在高转速时基

本重合,主要是因为蜂窝表面摩擦因数较大,有效的抑制了泄漏气体周向速度的增加,减小了黏性流体之间的摩擦生热,从而降低了齿形曲线长度引起的温升影响.

2.3 衬套结构对风阻特性的影响

图 7 给出了同一压比同一齿形下,衬套结构对风阻系数的影响.压比为 1.1 时,对于斜齿而

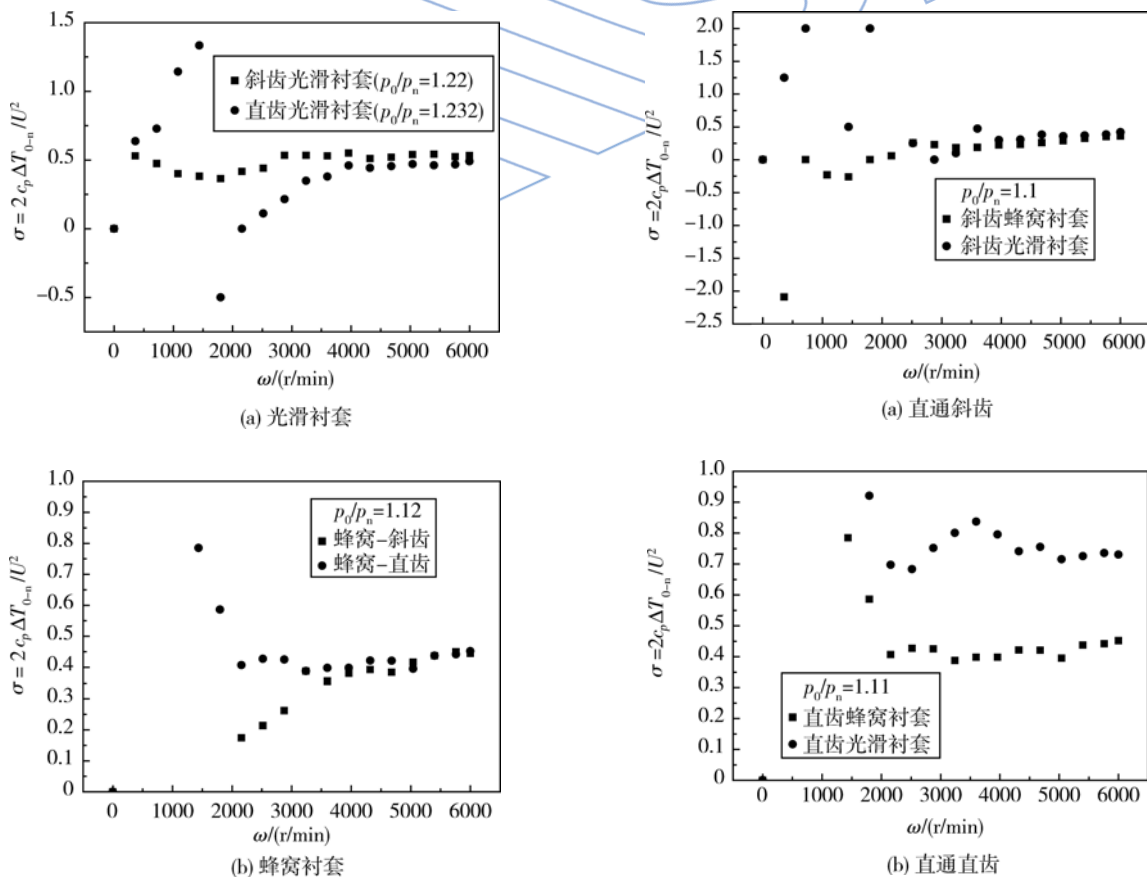


图 6 齿形对风阻系数的影响

Fig. 6 Effect of tooth on windage heat coefficient of labyrinth seal

图 7 衬套对风阻系数的影响

Fig. 7 Effect of bush on windage heat coefficient of labyrinth seal

言,蜂窝衬套和光滑衬套结构风阻系数基本重合,风阻系数基本相等.压比为1.11时,对于直齿结构,蜂窝衬套结构风阻系数仅为光滑衬套的一半.这是因为蜂窝衬套节流间隙(0.25 mm)要比光滑衬套(0.2 mm)多0.05 mm.当节流间隙很小时,增加间隙会导致风阻系数显著下降.故采用相同的节流间隙,对于斜齿而言,蜂窝衬套的风阻系数大于光滑衬套,这与文献[4]中蜂窝衬套风阻生热高于光滑衬套并不矛盾.

3 结 论

通过以上的分析,主要得到以下几点结论:

1) 旋转的篦齿对气流做功是气流总温上升的能量来源,随着转速增大,风阻生热引起的总温升速度加快,转速越高篦齿对气流的做功能力越强.

2) 对于相同齿形,蜂窝衬套风阻系数要比光滑衬套有所增加.气流旋转比的发展是影响沿程温升分布的重要因素,光滑衬套对气流的黏滞作用比蜂窝衬套小.因此气流旋转比在前半段迅速增大后增速减缓,风阻温升主要集中在前半段;而蜂窝衬套对气流的黏滞作用使气流旋转比的增速更加均匀,风阻温升的分布也较均匀.

3) 对于相同衬套,由于斜齿比直齿齿面的曲线长度大,引起的风阻生热高于直齿.

参考文献:

- [1] 王鹏飞,刘玉芳,郭文,等.高转速对直通型篦齿封严特性影响的试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2007,20(2):45-49.
- WANG Pengfei, LIU Yufang, GUO Wen, et al. Influence of high rotational speeds on the labyrinth sealing characteristics[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(2):45-49. (in Chinese)
- [2] 《航空发动机设计手册》总编委会编.航空发动机设计手册.第12册,传动及润滑系统[M].北京:航空工业出版社,2001.
- [3] McGreenhan W, Ko S. Power dissipation in smooth and honeycomb labyrinth seals[R]. ASME 89-GT-220, 1989.
- [4] Millward J, Edwards M. Windage heating of air passing through labyrinth seals[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(3):414-419.
- [5] Stocker C. Aerodynamic performance of conventional and advanced design labyrinth seals with solid smooth, abratable and honeycomb lands [R]. USA: NASA, CR-135307, 1977.
- [6] Nayak K C, Musthafa T. The effects of tooth tip wear and its axial displacement in rub-grooves on leakage and windage heating of labyrinth seals with honeycomb lands[R]. AIAA 2007-5736, 2007.
- [7] Nayak K C, Musthafa T, Sudipta D. The effect of rub-grooves on leakage and windage heating in labyrinth seals with honeycomb lands[R]. AIAA 2007-5737, 2007.
- [8] 呼艳丽,刘玉芳,王鹏飞.旋转状态下阶梯齿风阻温升的初步分析[J].燃气涡轮试验与研究,2009,22(3):47-49.
- HU Yanli, LIU Yufang, WANG Pengfei. Preliminary analysis of the windage temperature rise in rotating labyrinth seals[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(3):47-49. (in Chinese)
- [9] Denecke J, Dullenkopf K, Wittig S, et al. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals[R]. ASME Paper, GT2005-68677, 2005.
- [10] Schramm V, Willenborg K, Kim S, et al. Influence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(1):141-146.
- [11] Rhode D L. Measurement and visualization of leakage effects of rounded teeth tips and rub-grooves on stepped labyrinths[J]. Transaction of the ASME, 2001, 123(3):604-611.
- [12] 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.
- [13] 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)