

蜂窝面迷宫密封内流动和总温升特性的研究

晏鑫, 李军, 宋立明, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 研究了典型燃气轮机蜂窝面迷宫密封内的流动和总温升特性, 并与光滑面迷宫密封进行了比较. 采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型数值求解了三维 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS)方程, 计算了2种流量、不同转速时蜂窝面和光滑面迷宫密封的内流场以及间隙热系数. 计算得到的蜂窝面和光滑面迷宫密封的间隙热系数与实验数据吻合良好, 验证了数值方法的可靠性. 研究结果表明: 在相同转速、径向间隙和流量条件下, 蜂窝面迷宫密封的总温升高于光滑面迷宫密封, 即蜂窝面迷宫密封的间隙热系数高于光滑面迷宫密封, 表明蜂窝面的阻尼作用提高了间隙热系数. 对于蜂窝面和光滑面迷宫密封, 其总温升和间隙热系数随转速的升高而增大, 随流量的增大而减小. 对于蜂窝面迷宫密封, 在相同转速条件下, 泄漏流量的增大使得子午面上速度增大, 但密封内的泄漏流动形态基本相似, 光滑面迷宫密封内的泄漏流动形态也具有类似特性.

关键词: 蜂窝面迷宫密封; 泄漏流动; 间隙热系数

中图分类号: TK262 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0823-05

Study on Flow and Total Temperature Increase of Honeycomb Labyrinth Seals

YAN Xin, LI Jun, SONG Liming, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The leakage flow and total temperature increase characteristics of a honeycomb labyrinth seal used in a typical gas turbine were numerically investigated and compared with a smooth labyrinth seal. The Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) equations and standard $k-\epsilon$ turbulent model were adopted. The calculation of the leakage flow field and total temperature increase of two kinds of labyrinth seals with honeycomb stator and smooth stator were conducted at two kinds of leakage flow rates and different rotational speeds. The computed windage heating numbers of the honeycomb and smooth labyrinth seals agree well with the experimental data. The results show that the windage heating number of the honeycomb labyrinth seal is higher than that of the smooth one at the same leakage flow rate and rotational speed. The damping characteristics of the honeycomb cell enhance the windage heating number. The windage heating number increases with the increase of rotational speed and decreases with the increase of the leakage flow rate for the honeycomb and smooth labyrinth seals. For both the honeycomb labyrinth seal and smooth labyrinth seal, the increase of the leakage flow rate increases the meridional velocity at the same rotational speed, but the leakage flow fields of different leakage flow rate exhibit the similar flow pattern.

Keywords: honeycomb labyrinth seal; leakage flow; windage heating number

符 号 表

a	声速, m/s	R_R	转子半径, m
h	蜂窝芯格深度, m	Re_x	轴向雷诺数($Re_x = m / \mu_m \pi R_m$)
H	间隙热能, W	Re_c	Couette 雷诺数($Re_c = \rho \omega R_S (R_S - R_R) / \mu$)
l	蜂窝芯格内切圆直径, m	U	转子的平均转速($U = \omega R_m$)
Mu	周向马赫数($Mu = U/a$)	σ	间隙热系数
$\dot{m}$	泄漏的质量流量, kg/s	ΔT_{total}	总温升, K
R_m	转子平均半径, m	ω	转子转速, r/min
R_S	静子半径, m	μ_m	工质的平均动力黏性系数, N · s/m ²

先进的转子和静子间动密封技术可显著提高叶轮机的工作效率和可靠性,允许更小的间隙、可靠工作的密封内流动与总温升特性的研究将成为叶轮机机械密封技术研究和发展的一个方向。与光滑面密封相比,蜂窝密封不仅具有良好的封严特性,还具有优良的转子动力特性,因而被广泛应用于各类叶轮机机械密封系统中。美国航天飞机中的高压液氧透平泵,使用了蜂窝密封后消除了亚同步振动^[1]。在高压离心压气机中,为了增加转子的稳定性,常使用蜂窝密封替代传统的迷宫密封^[2]。用于某核电站 650 MW 的汽轮机,在低压缸和次末级使用了基体上开有周向贯通疏水槽的蜂窝密封,使得漏汽量大大减小,提高了机组的效率。

在广泛关注蜂窝密封内转子动力特性和流动特性的同时,动密封结构内所特有的总温升特性——间隙热能效应同样不容忽视。由于对燃气轮机性能要求的提高,使得燃气温度和压比逐年提升,导致工作于高温燃气中的叶片和其他部件必须采用更为严格的冷却保护措施。在内部气流冷却系统中,密封部件的主要功能是减小泄漏量,即阻止高温燃气进入冷却系统。但是,随之而来会引发另外一个问题:密封结构内高速旋转的转子面和静子面均与黏性工质间存在切应力,切应力会对黏性气流做功。从能量转化方面来看:轴端输入能量中的一部分转化成为了工质的内能,这不仅导致能量的损失,还会由于间隙热能效应使得工质(冷却气流)的总温升高,降低了冷却气流的冷却质量^[3]。为了保证高温部件运行的安全,必须从主流通道中抽出更多的工质来补充冷却气流量,但这样会使得有用工质减少,机组效率降低。因此,能否对高温燃气透平密封结构内的总温升特性进行准确地预测将会影响到机组的寿命和效率,研究蜂窝密封内的总温升特性和流动特性对燃气轮机性能提高具有重要意义。

目前,已有不少关于蜂窝密封转子动力特性^[2]

和流动特性^[3-5]的研究,但蜂窝密封中的间隙热能效应却未能较好的预测,用于准确计算蜂窝密封内温升特性的理论和经验公式十分少。Millward & Edwards^[6]通过测定具有不同齿型、不同静子面型式的密封中的间隙热能,得出了一个可以用于计算迷宫密封、蜂窝密封中间隙热能的经验公式,但该公式在计算其他的密封时,预测的精度较低。相关的经验公式最大的缺点是需要根据工程经验进行修正,而且不同的学者所使用的修正系数也不相同。数值求解三维 RANS 方程技术并结合实验则克服了上述的不足,它不仅能直接得出相关的间隙热能和间隙热系数,还会较为全面地揭示蜂窝密封内流场和温度场的详细结构。

本文使用 CFX 软件,采用三维计算模型,研究了 2 种流量、不同转速条件下蜂窝面密封内的流动及总温升特性,得出了蜂窝密封中的间隙热系数与周向马赫数的关系,并与实验结果^[3]进行了比较。

1 计算模型和数值方法

图 1 是文献^[3]给出的典型燃气轮机密封系统中的光滑面或蜂窝面迷宫密封结构示意图,从图中可以看出光滑面或蜂窝面迷宫密封在燃气轮机密封系统设计中的应用位置和气流流动方向。图 2 是文献^[3]给出的蜂窝面迷宫密封结构示意图,静子采用阶状蜂窝面结构设计,转子是高低齿迷宫设计。光滑面迷宫密封转子平均半径为 253 mm,齿高为 4 mm,径向间隙为 1.3 mm。静子蜂窝面的芯格尺寸:芯格直径为 1.59 mm,深度为 4.2 mm。

图 3 为蜂窝面迷宫密封三维结构造型和网格生成过程示意图。计算时采用的是 ICEM 商用软件生成的结构化网格。腔室区域节点数为 23.3 万,蜂窝区域节点数为 24.4 万,总的计算节点数为 47.7 万。网格的最小角度大于 45°,最大长宽比小于 100。

采用商用流体动力学软件 CFX 数值求解

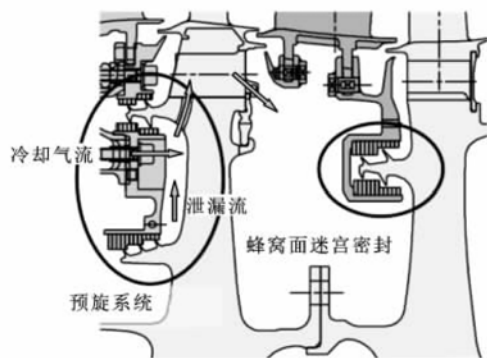
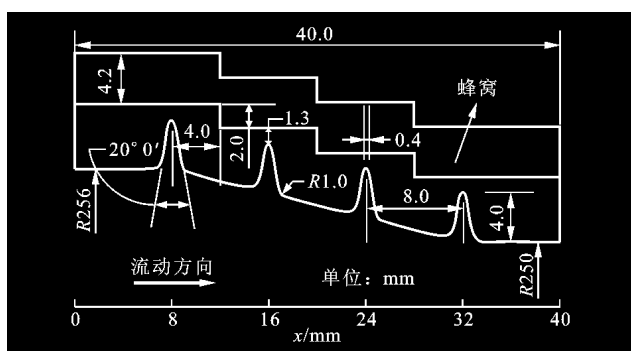
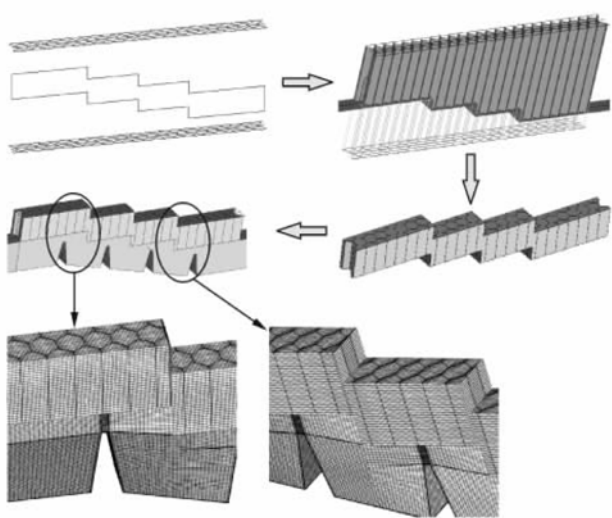
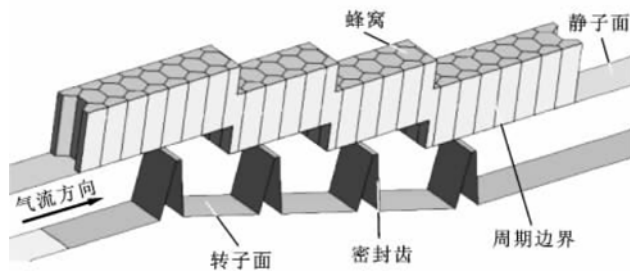
图1 BR700系列高压燃气轮机空气冷却系统示意图^[3]图2 密封结构示意图^[3]

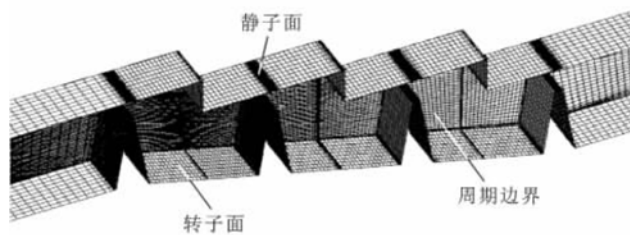
图3 蜂窝面迷宫密封三维造型和网格生成图

RANS方程。在计算中,考虑到结构的周期性,取一部分弧段作为研究对象,弧段的两侧采用周期性边界;转子面为旋转固壁;工质为理想空气;进口给定总温(300 K)和流量,湍流度取5%;出口给定静压(200 kPa)。紊流模型采用标准 $k-\epsilon$ 二方程模型,近壁面区采用壁面函数法(scalable Log wall func-

tion)求解,离散格式为高精度格式。壁面采用无滑移绝热固壁。为了比较蜂窝面迷宫密封与光滑面迷宫密封内的总温升特性,分别计算了径向间隙相等时2种结构内的间隙热系数。图4分别给出了蜂窝面和光滑面迷宫密封计算区域和边界条件的设置。当动量方程残差达到 10^{-6} 数量级、传热方程和湍流方程残差小于 10^{-6} 数量级、进出口流量相差小于0.1%时,认为计算收敛。



(a)蜂窝面迷宫密封



(b)光滑面迷宫密封

图4 计算区域边界条件设置

2 结果与分析

为了便于分析比较,引入归一化轴向雷诺数 Re_x 、周向马赫数 Mu 。文献^[3]在实验工况下,分别保证 Re_x 为10 000和20 000,两种条件下所对应的有效压比近似为1.05和1.3、流量近似为0.15 kg/s和0.30 kg/s。在每种流量下通过改变转速来测定间隙热系数,光滑面迷宫密封的转速变化范围是4 000~12 000 r/min,蜂窝面迷宫密封的转速变化范围是4 000~8 200 r/min。

在绝热条件下,密封内转子损失的能量转化为流体的内能,引起流体总温的升高。定义间隙热能为

$$H = mC_p\Delta T_{\text{total}} \quad (1)$$

定义间隙热系数为

$$\sigma = 2C_p\Delta T_{\text{total}}/U^2 \quad (2)$$

本文所用到的实验数据来自于文献^[3]。文中指出实验得到的间隙热系数误差在2%~30%之间,平均误差在10.2%左右。

2.1 光滑面迷宫密封温升特性

在相同的流动条件下 ($Re_x = 10\ 000$, $Mu = 0.313$), 选取3种不同的网格数对光滑面迷宫密封内 σ 进行计算来考核所采用的数值方法. 计算结果列于表1. 从表1可以看出, 当网格数由14.2万增大到25万时, σ 的误差仅为1.03% (相对于25万网格数而言). 可见在计算中, 对光滑面迷宫密封的数值模拟采用14.2万的网格数就可以满足网格无关性要求, 但在蜂窝密封数值模拟中, 考虑到该结构中的流动要比光滑面迷宫密封复杂, 将腔室区域的节点数增至23万.

表1 σ 与网格节点数的关系

节点数	σ 计算值	σ 实验值
9.4万	0.383	
14.2万	0.388	0.380
25万	0.392	

图5给出了光滑面迷宫密封中 σ 随 Mu 的变化规律. 由 Mu 和 Re_x 的定义式可知, Mu 反映的是转子转速的大小, Re_x 反映的是流量的大小. 从图5可以看出, 在相同流量条件下, 随着转子转速的提高, σ 逐渐增大. 当 $Re_x = 10\ 000$ 时 (见图5a), 计算结果与实验结果吻合较好, 明显优于 Denecke 的二维轴对称模型和经验公式所得到的结果. 当 $Re_x = 20\ 000$ 时 (见图5b), 本文采用的三维计算模型与 Denecke 的二维轴对称模型得到的结果精度相近, 本文的计算结果要稍高于实验值^[3], McGreehan & Ko^[7] 和 Millward & Edwards 经验公式得到的结果明显比实验结果小. 因此, 本文的三维计算模型能较好地模拟出光滑面迷宫密封中的总温升规律, 该模型要明显优于经验公式, 与二维轴对称模型相比具有一定的优势. 从图5a和图5b可以看出, 在相同转速下, 当轴向雷诺数增大一倍时, σ 约减小25%, 表明总温升随流量的增大而减小. 如果靠增大泄漏量来降低总温升, 在工程应用中是不经济的, 因为泄漏量增大将会产生较大的二次流动损失.

2.2 蜂窝面迷宫密封温升特性

图6给出了2种流量下蜂窝面迷宫密封时 σ 与 Mu 的关系. 本文的3D模型在 $Re_x = 20\ 000$ 时的计算结果与实验值^[3]吻合较好; 在 $Re_x = 10\ 000$ 时, 计算结果要略低于实验值^[3], 且2条曲线平行, 说明计算得出的温度变化趋势正确. 因此, 对于蜂窝密封结构, 数值计算可以较好地模拟其中的温度场分布.

从图6可以看出, σ 随转速的升高而增大. 这是

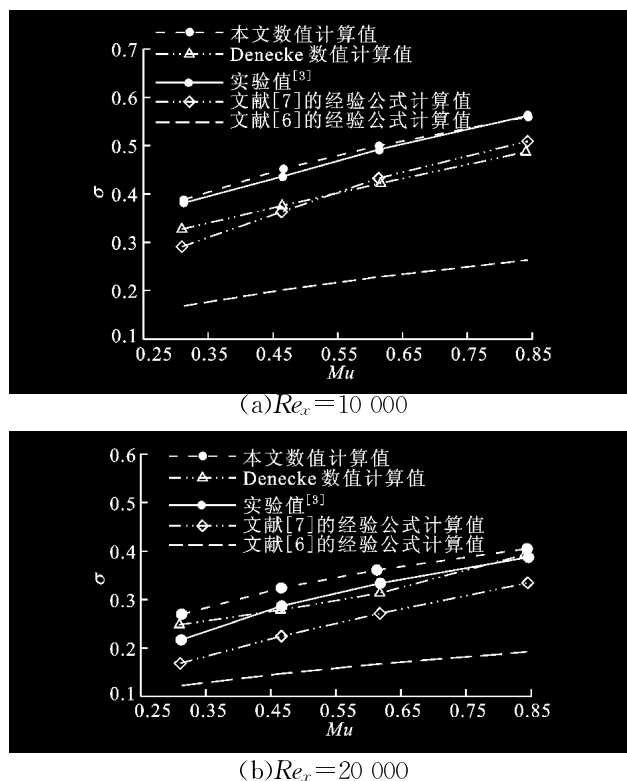


图5 光滑面迷宫密封间隙热系数随周向马赫数变化的曲线

由于流体存在黏性, 随着转子转速的升高, 转子对流体的切应力增大, 黏性功也会增大. 由能量守恒可知, 黏性功转化为内能使得工质的总温升高, 导致 σ 增大. 与光滑面迷宫密封类似, 在相同转速下, 流量增大1倍使得 σ 约下降25%. 对比图5和图6, 在相同转速、径向间隙和流量条件下, 蜂窝面迷宫密封内的间隙热系数略高于光滑面迷宫密封, 说明蜂窝面的阻尼作用对密封内总温的升高起促进作用.

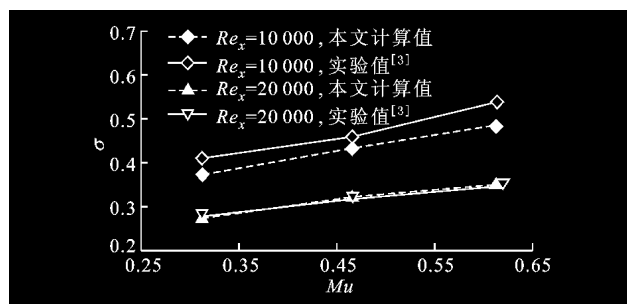


图6 1.59 mm 蜂窝面迷宫密封间隙热系数随周向马赫数变化的曲线

图7a给出了 $Re_x = 10\ 000$ 时, 光滑面迷宫密封中收敛通道内的速度矢量图, 气流在密封的间隙处加速, 最大速度出现在第4齿间隙的下游. 每个腔室内均存在2个旋向相反的涡流, 分别位于齿后和静子拐角后部. 其中齿后的涡流尺寸较大, 占据了腔室

的一半空间,静子拐角后的涡流尺寸较小.从图7可见:静子拐角后的涡流尺寸直接影响进入间隙的高速流体的入射角(气流的速度矢量与轴向的夹角).拐角后的涡流尺寸越大,入射角就越大.



(a) $Re_x=10\,000$, $Mu=0.61$



(b) $Re_x=20\,000$, $Mu=0.61$

图7 光滑面迷宫密封子午面上的二维速度图

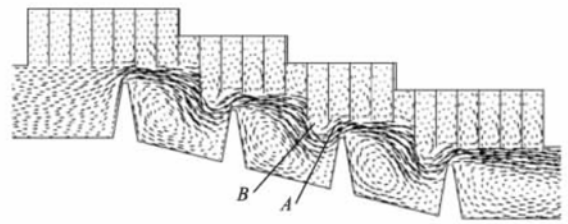
2.3 光滑和蜂窝面迷宫密封的流动形态

当 $Re_x=20\,000$ 时(见图7b),密封内流场结构不变,每个腔室中仍存在2个涡流,且尺寸和位置均未变化.流量的改变对流体进入间隙的入射角也无明显影响,仅使得气流的速度增大,其中密封间隙处射流速度的增大最为明显.因此,对于相同的密封结构,流量的变化不会对子午面上的流场结构产生影响.

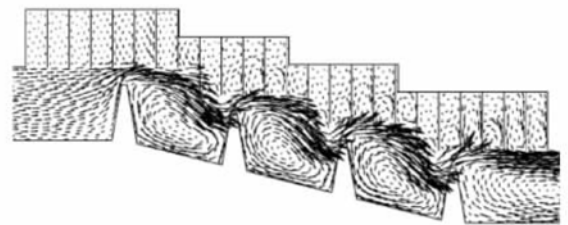
从图8可以看出,在相同转速时,不同流量下流动形态类似.随着流量的增大,子午面上速度也增大,但流场结构并不发生变化.这说明流量的变化只会影响到子午面上速度的大小,并不影响蜂窝面迷宫密封中的流场结构.气流在间隙处加速,每个腔室均存在一个尺寸较大的旋涡.蜂窝中充斥着低速的流体,各个蜂窝孔中也形成了尺寸相近的旋涡.在靠近间隙处,蜂窝孔中的这些旋涡受到腔室中气流的影响,或被压入孔内(见图8的A处),或将腔室中的流体推向转子面方向(见图8的B处),这都会影响到流体通过间隙时的入射角.与光滑面迷宫密封相比,静子蜂窝芯格表面的阻尼作用改变了流动形态,进而影响泄漏流动和间隙热系数.

3 结 论

采用3D周期性模型,计算了2种流量下蜂窝面迷宫密封中的流动和总温升特性,得出了 σ 随转速的变化关系,并与实验结果以及光滑面迷宫密封



(a) $Re_x=10\,000$, $Mu=0.46$



(b) $Re_x=20\,000$, $Mu=0.46$

图8 蜂窝面迷宫密封子午面上的二维速度图

计算结果进行了比较.研究结果对于提高燃气轮机用蜂窝面迷宫密封性能提供了技术支撑,并从中得出了如下结论.

(1)采用3D周期性模型计算的结果与实验值吻合良好,说明数值模拟能较好地预测蜂窝面迷宫密封中的总温升特性.

(2)在相同转速和流量条件下,径向间隙相同时的蜂窝面迷宫密封的间隙热系数略高于光滑面迷宫密封.在相同流量下,光滑面迷宫密封、蜂窝面迷宫密封的 σ 均随着转速的升高而增大;在相同转速的前提下,流量增大1倍, σ 约减小25%.

(3)流量只影响蜂窝面和光滑面迷宫密封中速度的大小,对密封子午面上流场结构的影响可以忽略.

参考文献:

- [1] CHILDS D, MOYER D. Vibration characteristics of the HPOTP (high pressure oxygen turbopump) of the SSME (space shuttle main engine)[J]. ASME J Eng Gas Turbines Power, 1985, 107(1):152-159.
- [2] SPROWL T, CHILDS D. A study of the effects of inlet preswirl on the dynamic coefficients of a straight-bore honeycomb gas damper seal[J]. ASME J Eng Gas Turbines Power, 2007, 129(2): 220-229.
- [3] DENECKE J, DULLENKOPF K, WITTIG S, et al. Experimental investigation of the total temperature increase and swirl development in rotating labyrinth seals [C]//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2005, Reno-Tahoe, Nevada, USA: ASME, 2005: 1161-1171.
- [4] SCHRAMM V, WILLENBORG K, KIM S, et al. In-

- fluence of a honeycomb facing on the flow through a stepped labyrinth seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, 124(1): 140-146.
- [5] WILLENBORG K, SCHRAMM V, KIM S, et al. Influence of a honeycomb facing on the heat transfer in a stepped labyrinth seal[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, 124(1): 133-139.
- [6] MILLWARD J, EDWARDS M. Windage heating of air passing through labyrinth seals[J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(3): 414-419.
- [7] MCGREEHAN W, KO S. Power dissipation in smooth and honeycomb labyrinth seals[C/CD]// *Proceedings of the ASME Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*. Toronto, Canada: ASME, 1989: 89-GT-220.

(编辑 王焕雪)