

压比和雷诺数对压气机级间篦齿封严 流动特性的影响

刘高文¹, 陈凯¹, 刚铁², 郑海亮²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 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: 为了解压气机级间封严的流动特性,以某航空发动机压气机为研究对象,对带有进出口旋转盘腔的级间篦齿结构进行了数值模拟。在压比范围为1.05~1.30,雷诺数范围为100~50 000下,研究了压比和雷诺数对篦齿泄漏特性、旋流特性和风阻温升特性的影响,对比了包括篦齿和进出口旋转盘腔的系统参数与仅含篦齿的直齿参数的不同。计算结果表明进出口旋转盘腔对篦齿的流动特性有较大的影响;随着压比的增大,流量系数增加,封严效果下降,出口旋转比和风阻温升减小;随着雷诺数的增大,流量系数明显增大,出口旋转比和风阻温升也显著减小;在高雷诺数时,流量系数、出口旋转比和风阻温升变化幅度微小。

关 键 词: 压气机; 篦齿封严; 级间封严; 泄漏; 压比; 旋流; 风阻温升

中图分类号: V231

文献标志码: A

Influences of pressure ratio and Reynolds number on flow characteristics of labyrinth seal in compressor stator well

LIU Gao-wen¹, CHEN Kai¹, GANG Tie², ZHENG Hai-liang²

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: To study the flow characteristics of a labyrinth seal in a compressor stator well, numerical simulations on the performances of a labyrinth seal with inlet and outlet rotating disc cavities of an aero-engine compressor was carried out. Sealing characteristics, swirl characteristics and windage heating characteristics were studied in depth at pressure ratio range 1.05—1.30 and Reynolds number range 100—50 000. The differences of the flow characteristics of straight-through labyrinth with/without inlet and outlet rotating disc cavities were compared. The computational results show that inlet and outlet rotating disc cavities have obvious influence on the flow of the labyrinth. With the increase of pressure ratio, the discharge coefficient increases, and the sealing effect grows worse, while the outlet swirl ratio and windage heating decreases. With the increase of Reynolds number, the discharge coefficient increases significantly, the outlet swirl ratio and windage heating decreases. At high Reynolds number, the discharge coefficient, outlet swirl ratio and windage heating changes slightly.

收稿日期: 2014-01-22

作者简介: 刘高文(1974—),男,四川广安人,副教授,博士,研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动传热。

E-mail: gwliu@nwpu.edu.cn

Key words: compressor; labyrinth seal; stator well; leakage; pressure ratio; swirl; windage heating

篦齿封严是目前航空发动机中广泛应用的一种简单可靠的非接触式封严结构. 它通过减小旋转件和静止件之间的间隙来减小气流泄漏量. 当气流通过篦齿时, 气流被多次节流加速, 压力能转换成动能, 并在湍流和黏性耗散的作用下转换成热能而消耗掉, 最终达到封严效果. 国内外学者对篦齿封严作了很多研究. Sturgess^[1]指出航空发动机技术的改进一半取决于材料性能的改良, 一半取决于封严技术的改进. 徐再清等^[2]研究了压比、齿数等因素对直通式和交错式篦齿齿腔内流场分布的影响. 文献[3-7]用数值模拟和实验方法研究了不同结构参数和气动参数对带蜂窝的篦齿封严泄漏的影响. 杨汇涛等^[8]研究了旋转等因素对篦齿封严泄漏流动、换热的影响, 推导出可供实验模化用的相似准则. 文献[9-12]研究了转速对直通式篦齿的影响, 结果表明转速的提高会使篦齿的封严效果增加. LI等^[13]的研究表明齿斜度对直通式篦齿和台阶式篦齿的封严影响不可忽略. 张震等^[14]的实验表明泄漏系数随雷诺数的增加而增大. Gamal等^[15]用实验方法研究了齿型、齿宽对篦齿封严的影响, 结果表明齿宽和齿型对篦齿的封严影响较大. Denecke等^[16]实验研究了旋转篦齿的总温和旋流的变化. 吴宏等^[17]基于流体网络法, 完成了对直通式篦齿封严的计算模型开发.

虽然对篦齿的封严特性国内外已有大量的研究, 但是针对航空发动机压气机级间篦齿封严(下文简称级间封严)的研究较少. 而且对篦齿的泄漏特性研究较多, 对篦齿的旋流特性和风阻温升特性的关注较少. 本文针对压气机级间封严结构, 对带有进出口旋转盘腔的篦齿进行数值模拟, 研究压比和雷诺数对篦齿泄漏、出口旋流和风阻温升的影响, 并研究进出口旋转盘腔的影响. 相应的实验研究正在进行中.

1 计算模型和计算方法

1.1 计算模型

图1为典型的航空发动机压气机级间封严结构. 在压气机动叶的作用下, 主通道气流从低压流向高压(图中从左到右), 流经静叶时, 气流减速增压, 使得静叶尾缘的压力高于静叶前缘, 这样气流就会从静叶根部与压气机鼓筒间的转、静间隙反

向(从右到左)流回主通道. 这股泄漏流对压气机的性能有较大影响, 必须采用适当的封严结构来控制这个泄漏量.

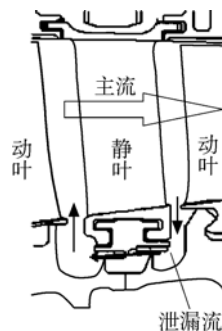


图1 压气机级间封严结构

Fig. 1 Structure of a labyrinth seal in a compressor stator well

对某压气机级间封严结构进行适当简化后, 得到本文的计算简化模型, 如图2所示, 虚线表示转动壁面, 实线表示静止壁面, 模型包括了进出口旋转盘腔. 为了避免计算域出口出现回流, 盘腔进出口设置了宽为1.5 mm, 长为5 mm的环缝. 为了获得包括篦齿和进出口盘腔的系统参数, 以及仅包括篦齿的直齿参数, 定义了A, B, C, D四个流动截面, 其中A, B截面分别定义为系统进口和出口, C, D截面分别定义为直齿进口和出口.

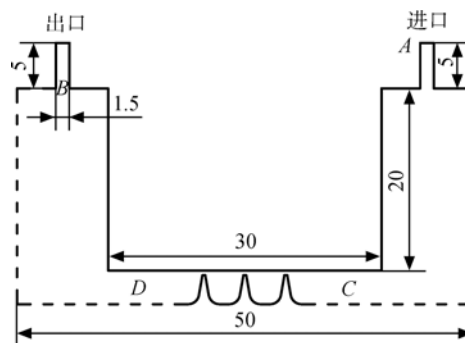


图2 简化模型(单位:mm)

Fig. 2 Simplified model (unit:mm)

图3给出了确定篦齿齿型的几个主要几何参数: 包括齿顶间隙 c , 齿顶宽 t , 齿高 H , 齿间距 B , 齿的倾斜角 α 及齿顶半径 R .

采用 Gambit 软件进行网格划分, 如图4所示, 篦齿附近区域采用非结构化三角形网格, 其他区域采用结构化四边形网格. 为了验证网格的无

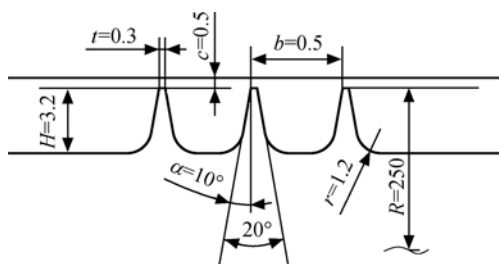


图3 篦齿主要几何尺寸(单位:mm)

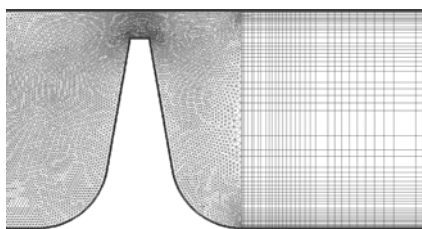
Fig. 3 Main geometrical dimensions of labyrinth
(unit:mm)

图4 计算模型网格划分

Fig. 4 Grid generation of computational model

关性,分别作了网格总数为12万,18万和24万左右的3个模型进行比较,流量系数计算结果偏差在0.5%以内,可忽略不计.选取18万网格总数模型进行计算,边界层为10层,壁面 y^+ 值在1左右.

1.2 计算方法和边界条件

采用商业软件Fluent 6.3进行求解,二维计算选择二维稳态轴对称旋流模型,压力和速度耦合采用SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法,离散格式为2阶迎风格式,湍流模型采用realizable $k-\epsilon$ 模型,近壁采用增强壁面处理方法,并考虑黏性耗散的影响.

进口给定压力进口条件(具体值由压比决定),径向进气,总温为500 K;出口给定压力出口条件,给定静压为0.2252 MPa,压比 π 的范围为1.05~1.30,转子转速为10281 r/min.固体壁面为无滑移壁面和绝热条件.流体为理想气体,密度、比热容和黏度等物性参数考虑随温度变化.

由于与本计算模型一致的实验结果尚未获得,暂采用Willenborg等^[18]的台阶式篦齿实验数据对上述计算方法进行验证,计算时采用与文献实验中相同的模型,与本文计算模型不同,但认为这是同一类篦齿问题.计算结果显示realizable $k-\epsilon$ 湍流模型的误差最小,收敛性最好,流量系数与实验结果的最大偏差在5%以内,故采用该湍

流模型.

2 参数定义

压比 π 定义为

$$\pi = \frac{p_0^*}{p_1} \quad (1)$$

其中 p_0^* 为进口总压, p_1 为出口静压.

篦齿流量系数 C_d 的定义为

$$C_d = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{\text{idea}}} \quad (2)$$

其中 $\dot{m}$ 为实际流量, $\dot{m}_{\text{idea}}$ 为理想流量.流量系数是一个量纲一参数,相对于有量纲的泄漏系数^[15],能更好地反映篦齿的泄漏量.

理想流量定义为

$$\dot{m}_{\text{idea}} = \frac{p_0^* A}{\sqrt{T_0^* R_g}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (3)$$

其中 T_0^* 为进口总温; A 为齿顶间隙流通面积, $A=2\pi R_c$; R_g 表示气体常数; κ 为等熵指数.

出口旋转比 β 为

$$\beta = \frac{V_\phi}{U} = \frac{V_\phi}{R\omega} \quad (4)$$

式中 V_ϕ 为气流的周向速度; U 为齿尖的转盘线速度; ω 为角速度.

风阻温升定义为

$$\Delta T = T_0^* - T_1^* \quad (5)$$

式中 T_1^* 为出口总温.

雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho V_x d}{\mu} = \frac{\dot{m}}{V_x 2\pi R_c} \cdot \frac{V_x}{\mu} \cdot \frac{4 \times 2\pi R_c}{4\pi R} = \frac{\dot{m}}{\pi R \mu} \quad (6)$$

其中 d 为当量直径; ρ , V_x , μ 分别为气流的密度,轴向速度和黏度.

3 计算结果与分析

3.1 基本流动特性

图5是压比 $\pi=1.20$ 时篦齿腔内的流线图,可以清楚地看到:在气流进入的右侧的进口腔,由于转盘转动,转子壁面附近的气流径向外流,静子壁面附近的气流径向内流,并在进口腔中形成一个较大的逆时针方向旋涡.转子壁面上气流的径向外流阻碍了气流进入进口腔,迫使进入气流从静子盘附近径向内流入进口腔内.因此进口旋转

盘腔对级间封严的泄漏起抑制作用。

而在左侧的出口腔,转盘转动使气流沿转子盘面径向外流,并顺势从出口环缝流出口腔。部分气流沿静子面径向内流,并在出口腔中形成顺时针的旋涡,这个旋涡对气流的流出起促进作用。因此出口旋转盘腔对级间封严的泄漏起促进作用。

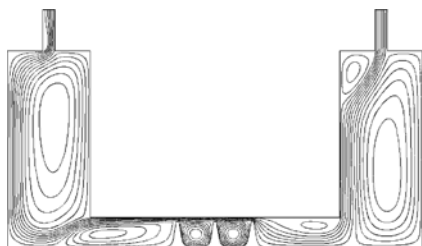


图 5 篦齿腔内流线图($\pi=1.20$)

Fig. 5 Streamlines in labyrinth cavities ($\pi=1.20$)

图 6 是压比 $\pi=1.20$ 时篦齿腔内的总温云图。气流温升很大一部分是由于转子对气流做功引起的,因此在旋转腔内,靠近转子壁面气流的总温较高,靠近进口腔转动面气流的温度高于齿尖处气流的温度。每经过一个篦齿,气流的温度升高。

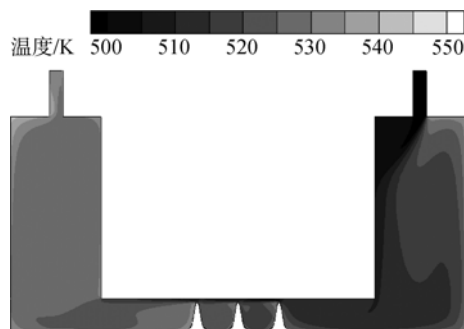


图 6 篦齿腔内总温云图($\pi=1.20$)

Fig. 6 Contours of total temperature in labyrinth cavities ($\pi=1.20$)

图 7 是压比 $\pi=1.20$ 时篦齿腔内的旋转比云图。可以看出,篦齿腔内气流的平均旋转比总体是增大的。在进口腔和出口腔内,由于转子的作用,靠近转子壁面的气流旋转比较大。篦齿腔内由于气流没有轴向速度,所以周向速度较大,旋转比较大。

3.2 压比的影响

在常见的压气机中,单级压比一般都小于 1.30,故本文的压比范围为 1.05~1.30,相应的

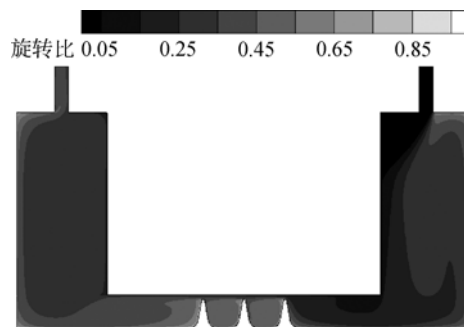


图 7 篦齿腔内旋转比云图($\pi=1.20$)

Fig. 7 Contours of swirl ratio in labyrinth cavities ($\pi=1.20$)

出口静压固定为 0.2252 MPa。压比反映了马赫数对篦齿流动特性的影响。

图 8 是计算得到的篦齿流量、流量系数、出口旋转比和风阻温升随压比的变化曲线,本文图中 SYS 代表整个系统的数据,压比为图 2 所示系统进口截面 A 平均总压与出口截面 B 平均静压之比;LB 代表直齿的数据,压比为图 2 所示直齿入口截面 C 平均总压和出口截面 D 平均静压之比。由图 8(a)可以看出,随着压比的增加,流量显著增加,封严效果下降。在齿顶间隙保持不变时,压比是影响篦齿泄漏流量的主要因素。

图 8(b)是流量系数随压比的变化曲线,由图可知,系统和直齿的流量系数都随压比的增加而增大。这是因为大压比对应高马赫数,相应的气流可压缩性大,流量系数大。在压比低于 1.23 时,系统流量系数高于直齿流量系数;而压比高于 1.23 时,直齿流量系数高于系统。这是因为压比较小时,流量较小,出口腔旋流的促进泄漏作用相对较大,导致系统流量系数高于直齿流量系数;而压比较大时,流量较大,整个进出口腔的平均旋转比低,旋流的离心升压作用减小,而与径向和轴向速度相关的沿程和拐弯损失随泄漏流量的增大而增大,故系统流量系数低于直齿流量系数。

图 8(c)是出口旋转比随压比的变化曲线。压比越大,系统和直齿的出口旋转比越小。这是因为大压比对应大的泄漏流量,气流的惯性大,难以被转盘带动,平均旋转比减小。压比为 1.05 时,系统出口旋转比为 0.4946,压比为 1.30 时,出口旋转比为 0.3733,下降了 24.5%。在所研究的压比范围内,直齿出口旋转比高于系统出口旋转比,这是因为在出口腔中,气流径向外流,出口旋转比随半径的增大而减小。

图 8(d)给出了风阻温升随压比的变化曲线。

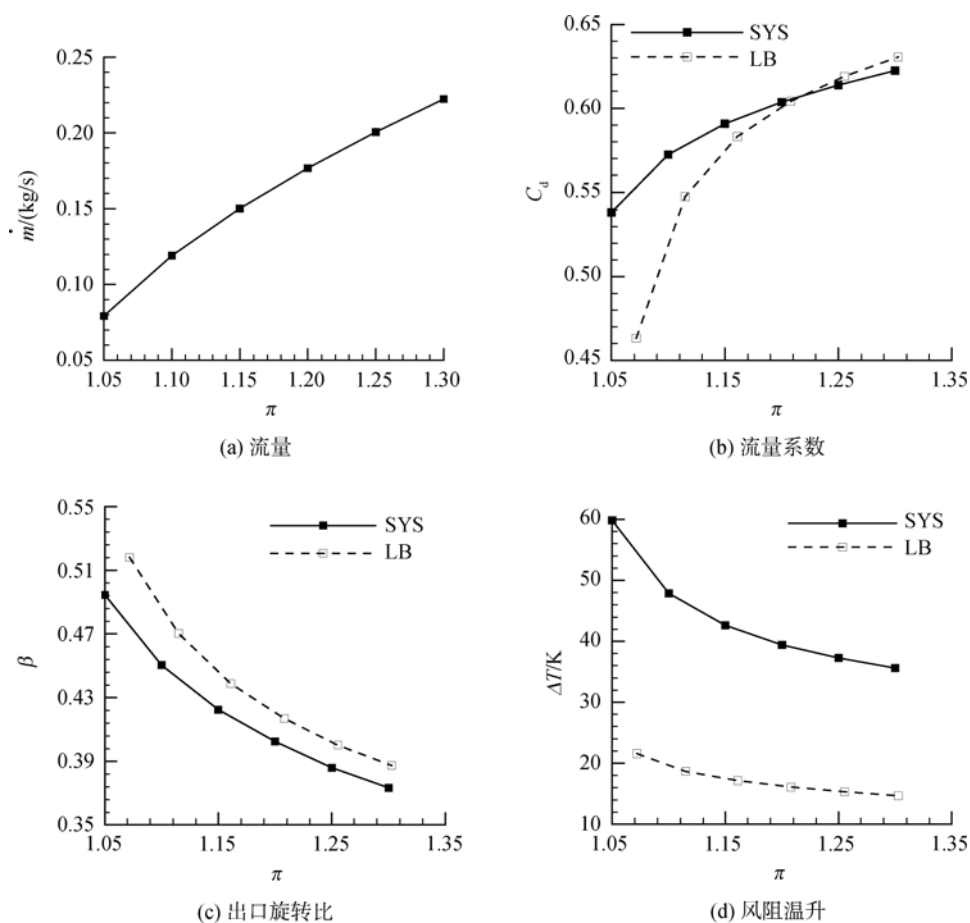


图8 压比对压气机级间封严流动特性的影响

Fig. 8 Influences of pressure ratio on flow characteristics of labyrinth seal in compressor stator well

随压比的增大,风阻温升降低.在压比较小时,风阻温升随压比的变化比较大;随着压比增大,风阻温升趋于平缓,受压比的影响较小.而系统的风阻温升要远远大于直齿段,而两者变化趋势一致.风阻温升主要是由于转子对气流做功引起的.在小压比时,气流的流量较小,在总作功量差别不大的情况下,温升较大.

3.3 雷诺数的影响

雷诺数主要反映流动状态(层流、过渡态和湍流)和湍流特性.本文在保持压比不变的条件下,通过改变出口静压而改变气流密度,实现对雷诺数的改变.出口静压的变化范围为 $0.01 \sim 0.9382$ MPa,相应的雷诺数变化范围为 $100 \sim 50\,000$.

图9(a)是不同压比下雷诺数对级间封严性能的影响.由图9(a)知,随着雷诺数的增大,流量呈线性增大.在不同压比下,流量随雷诺数的变化率相等.

图9(b)是流量系数随雷诺数的变化曲线.可以看到流量系数随雷诺数增大的整体趋势是先显

著增大后趋于平缓,雷诺数较小时,流量系数变化比较剧烈;随着雷诺数的增大,流量系数变化逐渐平缓.这是由于在低雷诺数时,流动处于过渡状态甚至层流,边界层较厚,黏性引起的流动损失大,故流量系数较低;而在高雷诺数时,流动处于充分的湍流状态,边界层薄且变化较小,黏性引起的流动损失随雷诺数的变化而变化的幅度小,所以流量系数较大且变化不明显.在小压比下,系统流量系数高于直齿流量系数,随着压比的增加,直齿流量系数逐渐高于系统,这与前文压比影响的原因一致.

图9(c)给出了雷诺数对出口旋转比的影响.由图可以看出,雷诺数较小时,出口旋转比所受影响较大,下降得比较剧烈,随着雷诺数增大,出口旋转比所受影响较小,但还是呈下降趋势.还可以看出,在各压比下,直齿的出口旋转比均高于系统.

图9(d)是雷诺数对风阻温升的影响.在小雷诺数时,风阻温升下降得比较快,后来随着雷诺数变大,风阻温升下降变慢,最后趋于平缓.

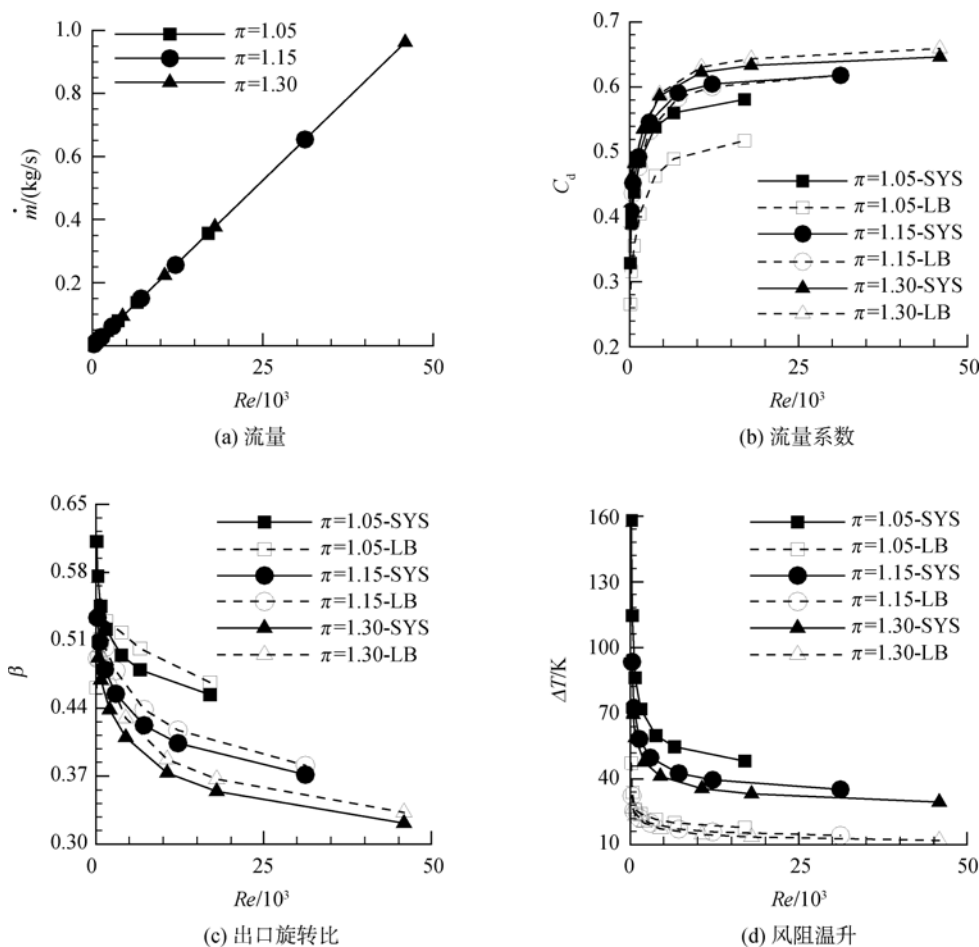


图9 雷诺数对压气机级间封严流动特性的影响

Fig. 9 Influence of Reynolds number on flow characteristics of labyrinth seal in compressor stator well

4 结论

对高转速下某航空发动机压气机级间封严流动特性进行了数值模拟,研究了进出口旋转盘腔的影响,讨论了压比和雷诺数对级间封严的系统直齿流量系数、出口旋转比和风阻温升的影响,主要结论如下:

1) 进出口旋转盘腔对篦齿泄漏特性、旋流特性和风阻温升特性都有显著影响。

2) 随着压比的增大,篦齿的流量和流量系数都增大,封严性能降低;系统与直齿出口的旋转比和风阻温升随着压比的增大而减小。

3) 随着雷诺数增大,篦齿流量系数先显著增大后逐渐趋于不变,出口旋转比和风阻温升先显著减小后慢慢趋于平缓。

参考文献:

[1] Sturgess G J. Application of CFD to gas turbine engine secondary flow system: the labyrinth seal[R]. AIAA 88-3203, 1988.

[2] 徐再清,朱惠人,白江涛.航空发动机篦齿封严特性数值分析[J].机械设计与制造,2008,2(6):31-33.

XU Zaiqing, ZHU Huiren, BAI Jiangtao. Numerical analysis of labyrinth seal in aircraft engines[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008, 2(6): 31-33. (in Chinese)

[3] 纪国剑,吉洪湖.旋转状态下篦齿-蜂窝结构封严特性研究[J].工程热物理学报,2006,27(1):161-164.

JI Guojian, JI Honghu. Investigation of sealing characteristics of labyrinth-honeycomb seal under rotating condition [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(1): 161-164. (in Chinese)

[4] Chougule H H, Ramerth D. Low leakage designs for rotor teeth and honeycomb lams in labyrinth seals[R]. ASME Paper 2008-GT-51024, 2008.

[5] Weinberger T, Dullenkopf K, Bauer H J. Influence of honeycomb facings on the temperature distribution of labyrinth seals[R]. ASME Paper 2010-GT-22069, 2010.

[6] Soemarwoto B I, Kok J C, de Cock K M J, et al. Performance evaluation of gas turbine labyrinth seals using computational fluid dynamics[R]. ASME Paper 2007-GT-27905, 2007.

[7] 纪国剑,吉洪湖,黄云霞,等.直通篦齿蜂窝封严结构的风阻特性试验[J].航空动力学报,2011,26(12):2655-2660.

- JI Guojian, JI Honghu, HUANG Yunxia, et al. Experiment investigation of windage heating on straight-through labyrinth seals with honeycomb bush[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2655-2660. (in Chinese)
- [8] 杨汇涛, 曹玉璋. 旋转篦齿封严泄漏与换热的准则研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(4): 438-441.
- YANG Huitao, CAO Yuzhang. Analogous criteria of leakage flow and heat transfer in labyrinth seals[J]. Journal Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(4): 438-441. (in Chinese)
- [9] 王锁芳, 吕海峰. 转静态封严篦齿流场的数值分析和封严特性的研究[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 444-449.
- WANG Suofang, LÜ Haifeng. Numerical analysis of flow and experimental investigation of labyrinth sealing characteristics at rotational and static states[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 444-449. (in Chinese)
- [10] 王代军, 苏云亮, 罗翔. 旋转状态下篦齿流量特性试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(2): 41-44.
- WANG Daijun, SU Yuliang, LUO Xiang. Experimental investigation on leakage flow characteristics in rotating labyrinth seals[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2007, 20(2): 41-44. (in Chinese)
- [11] 王鹏飞, 郭文, 刘玉芳, 等. 直通式篦齿封严特性的数值分析和试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22(1): 32-36.
- WANG Pengfei, GUO Wen, LIU Yufang, et al. Numerical analysis and experimental investigation of straight-through labyrinth sealing characteristic[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(1): 32-36. (in Chinese)
- [12] 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): 45-48.
- 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): 45-48. (in Chinese)
- [13] LI Jun, YAN Xin, FENG Zhenping. Effects of pressure ratio and fin pitch on leakage flow characteristics in high rotating labyrinth seals[R]. AEME Paper 2006-GT-91145, 2006.
- [14] 张霞, 张效伟, 朱惠人, 等. 直通型篦齿封严特性的研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(8): 1753-1756.
- ZHANG Xia, ZHANG Xiaowei, ZHU Hui ren, et al. Experimental investigation on seal characteristics of straight-through labyrinth[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1753-1756. (in Chinese)
- [15] Gamal A M, Vance J M. Labyrinth seal leakage tests: tooth profile, tooth thickness, and eccentricity effects[R]. ASME Paper 2007-GT-27223, 2007.
- [16] 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 2005-GT-68677, 2005.
- [17] 吴宏, 李澎, 陶智. 直齿直通式篦齿封严计算模型[J]. 航空动力学报, 2012, 27(10): 2180-2187.
- WU Hong, LI Peng, TAO Zhi. Rectangular tooth straight through labyrinth seal analytical model[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10): 2180-2187. (in Chinese)
- [18] Willenborg K, Kim S, Wittig S. Effects of Reynolds number and pressure ratio on leakage loss and heat transfer in a stepped labyrinth seal[R]. ASME Paper 2001-GT-0123, 2001.

(编辑: 陈越)