

文章编号:1000-8055(2013)12-2746-06

1.5 级涡轮实验台前腔燃气入侵实验

张灵俊, 罗翔, 余鸿鹏, 郭隽

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 在 1.5 级涡轮实验台上, 针对不同转速和不同封严质量流量, 分别采用稳态压力测量、瞬态压力测量和二氧化碳体积分数法对燃气入侵现象进行了实验研究, 以确定不同工况下主流的动静叶相互作用对燃气入侵的影响以及入侵到盘腔的燃气在腔内与冷气的掺混过程。结果表明: 静叶后的时均压力在周向有明显的周期分布, 部分区域封严环外的压力高于腔内压力, 且随着封严质量流量增加, 这一区域逐渐缩小; 动叶扫掠带来同频率的压力波动, 对于燃气入侵的发生有着重要的影响; 通过二氧化碳体积分数实验获得了最小封严质量流量, 并得到在封严质量流量不足情况下燃气沿着静盘侧入侵盘腔的结果。

关 键 词: 航空发动机; 涡轮盘腔; 旋转; 燃气入侵; 封严

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on gas ingestion on forward disk cavity of 1.5 stage turbine rig

ZHANG Ling-jun, LUO Xiang, YU Hong-peng, GUO Jun

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,
School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An experimental investigation on the gas ingestion phenomenon was performed on the rig of 1.5 stage turbine with different rotating velocities and seal mass flow rates. The experimental measurements include time-average and unsteady pressure field measurements and carbon dioxide volume fraction technique. These data were used to find out the influence of the interaction between rotor blades and stator blades on the phenomenon of gas ingestion and investigate the details during the process of the main gas into the cavity. The study suggests that, some part of the pressure on the annulus out of the seal is higher than the pressure inside seal rim due to the circumferential variation following the vane pitch. And this part decreases as seal mass flow rate increases. An unsteady blade-periodic component is found in this experiment, which is also a key to ingestion. The minimum necessary value of seal mass flow rate is obtained by carbon dioxide volume fraction technique. And the fact that the path of the main gas ingestion into the disk cavity is arranged along the stator when seal mass flow rate is not enough can also be inferred.

Key words: aero-engine; turbine disk cavity; rotate; gas ingestion; seal

收稿日期: 2012-11-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.016.html>

基金项目: 国家自然科学基金(50806004)

作者简介: 张灵俊(1987—), 男, 山西晋城人, 硕士生, 主要从事旋转换热的研究。

封严气流的主要作用是对燃气进行密封,避免主流的高温燃气“入侵”或“倒灌”入盘腔而烧蚀转盘,从而使转盘工作在安全的温度条件下。要最大限度防止燃气入侵带来的损失必须提高冷气流量,然而冷气流量过多会导致发动机整机效率的下降,过少又难以达到封严效果。因此发动机设计者们希望有一套系统的理论来帮助他们确定发动机的最小封严流量,这就需要从理论上研究燃气入侵的机理。燃气入侵现象较为复杂,受到主流雷诺数、旋转雷诺数、冷气流量、封严结构、动静叶干涉等多种因素影响,其形成机理还没有被很好地说明。

国内外针对燃气入侵这一课题已经开展了各种各样的研究。最早的研究集中在没有主流的转静盘腔结构,这种没有主流的实验条件下,发生的入侵现象主要是由转盘的泵效应引起的。随后对燃气入侵问题的研究都集中在有主流的情况,主流周向压力不对称产生对盘腔的燃气入侵最早由 Campbell 等^[1-3]提出,并用实验证实。Roy 等^[4-6]分别测量了两种不同封严环结构下主流通道和腔内的非稳态静压分布,以及时间平均静压的分布,还有腔内局部入侵效率。Roy 等^[7-10]认为涡轮主流-盘腔系统中的三维非定常流场,会导致主流燃气通过封严环进入轴流涡轮的盘腔中。后来对燃气入侵的研究通常集中在具有静止的导叶和旋转的涡轮叶片的完整涡轮级结构的研究上,并认为主流通道周向压力的不对称是由主流通道内的动叶和静叶相互作用引起的。Bohn 等^[11-13]验证了这些规律,但是他们也发现对于一些简单结构的封严其封严效率会随着动叶的存在会降低。Owen^[14-15]对燃气入侵的机理进行了预测,他认为主流中存在压力的非稳态、非周向对称的压力场,当主流压力高于腔内压力,发生燃气入侵称为外环引起的入侵;腔内旋转的气流产生了一个沿径向的压力梯度,导致封严环内压力低于外部,这种入侵称为旋转效应引起的入侵。在一般涡轮机中,发生的两种入侵共同作用导致的联合入侵,并且一般情况下外环占据主导地位。

1 实验装置

实验在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家重点实验室的 1.5 级涡轮实验台上进行的。实验段是由进口导叶、动叶、出口静叶组成的 1.5 级涡轮,最高转速可达 3000 r/min。每一级布置有 18 个叶片,共计 54 个叶片。主流通过一个型

号为 KF3-95 No6.3E 的离心风机提供。体积流量可达 $18\,400 \sim 38\,200 \text{ m}^3/\text{h}$,经过导向叶片后以一定的方向和速度冲击吹动工作叶片旋转,将气体的动能转化成涡轮的机械能,再经过一级静叶后流入风机,从而模拟实际发动机涡轮的工作状态。实验段三维效果图如图 1 所示。

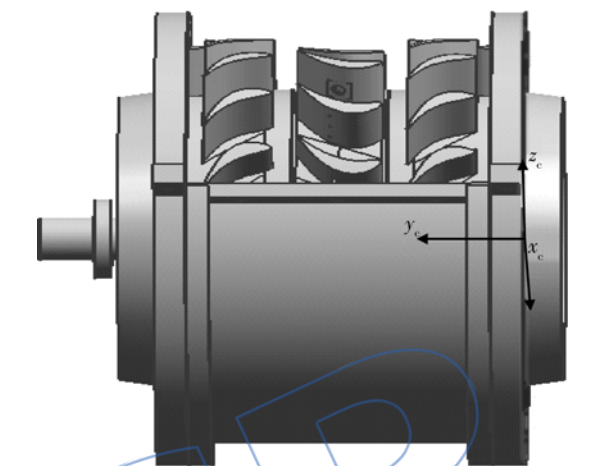


图 1 实验段三维效果图

Fig. 1 3-D diagram of experimental section

2 测试系统

主流质量流量由布置在实验段进口处的管型流量计测得,封严质量流量由热式流量计测得。稳态压力是由布置在测点位置上的压力探针,通过 PU(polyurethane)管引入一台多通道压力变送器获得。瞬态压力信号通过 SM-5652 差压传感器采集,再通过一台四通道高频信号采集分析仪将数据导入计算机。本实验采用北京华云 GXH-3010E 两通道二氧化碳体积分数分析仪同时监测封严气流来流体积分数和测点位置体积分数,将流量波动带来的误差消除。

3 实验结果

3.1 稳态压力测量结果

在图 2 中标示了各个测点所在位置,其中 b 为盘腔高度。其中 A, B, C, D 四个位置,沿周向覆盖一个叶片通道布置了 11 个测点,沿转子旋转方向编号为 1 至 11。其相对动静叶相对位置关系如图 3 所示。通过测量各点静压,分析静叶尾迹对盘腔内外压力分布的影响。

图 4 是涡轮转速为 1000 r/min,旋转雷诺数 $Re_\phi = 5.86 \times 10^5$,主流雷诺数 $Re_w = 1.174 \times 10^5$ 的情况下,位置 A 和位置 B 压力周向静压分布随

质量流量的变化情况. 由图可见, 两处位置的压力在一个叶片通道内都有明显的波峰和波谷, 波峰所在的周向位置对应于静叶尾缘处. 随着封严质量流量的增加, 压力分布曲线整体略有上移, 说明封严质量流量对主流的压力也有影响. 而位置 A

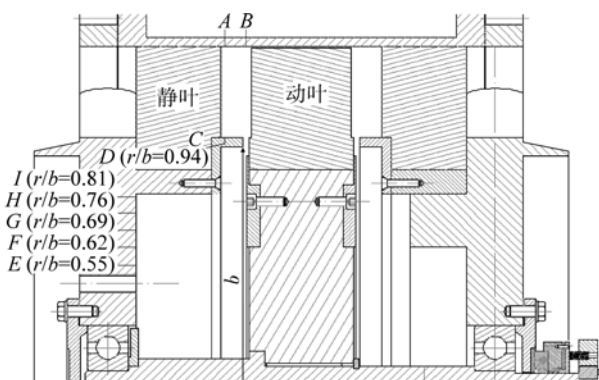


图2 盘腔结构及测点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of disc cavity structure and pressure measuring taps

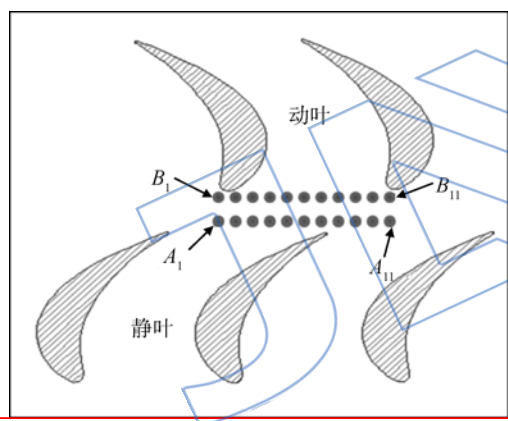


图3 叶片通道测点相对静叶位置关系示意图

Fig. 3 Schematic view of pressure taps relative position with vanes-blades

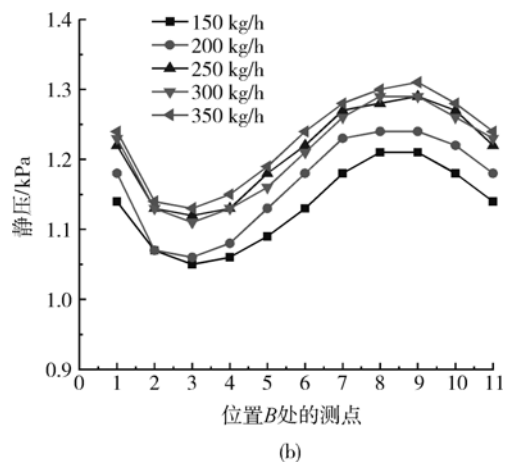
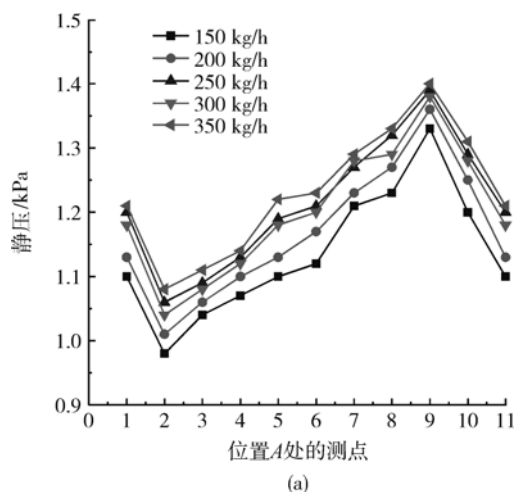


图4 位置A和位置B的周向静压分布

Fig. 4 Circumferential distribution of static pressure at locations A and B

和位置 B 的压力分布曲线又有不同, 在靠近静叶的位置 A 处, 曲线形状较尖锐, 峰峰值也较大; 而来到靠近下游的动叶前端位置 B, 由于远离了静叶尾缘, 加上动叶扫掠的影响, 曲线变得平滑, 峰峰值也有所减小.

图5和图6显示了盘腔内部静压的分布情况. 图5显示的是在位置 D ($r/b=0.94$) 处, 壁面测得的静压在一个叶片通道内的分布随封严流量变化情况, 而图6则显示的是在位置 E、位置 F、位置 G、位置 H、位置 I 五个径向位置测得的压力随封严流量变化情况. 由图中可以看出, 在测点位置覆盖的区域下, 腔内的压力无论沿径向或者周向都没有明显的变化, 仅随封严质量流量的增加而升高.

若取位置 C 测量结果作为腔外主流压力, 位置 D 测量结果作为腔内高位压力, 比较其在不同

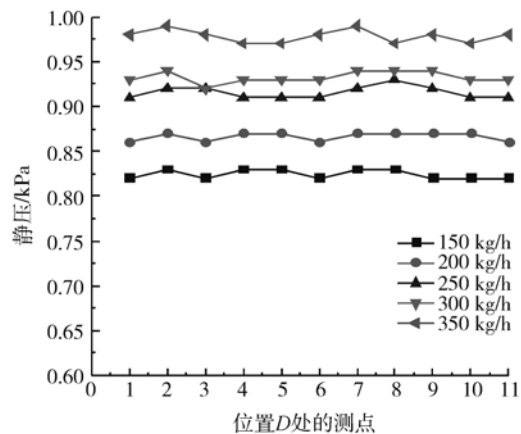


图5 盘腔内静压沿周向分布规律

Fig. 5 Circumferential distribution of static pressure in disk cavity

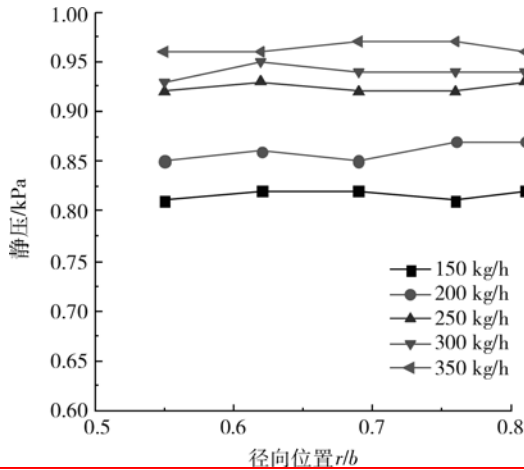
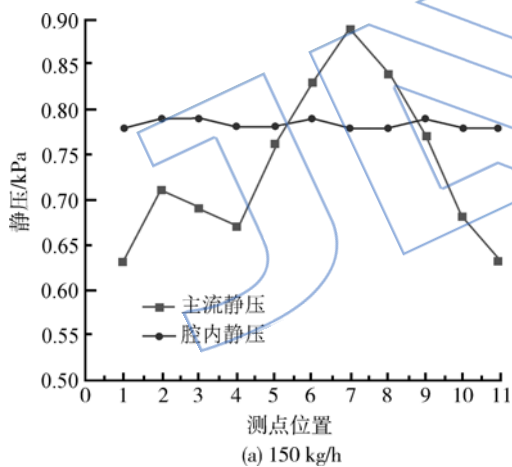


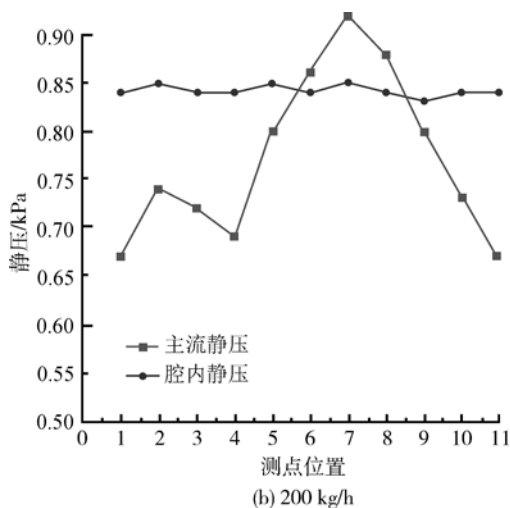
图 6 盘腔内静压沿径向分布规律

Fig. 6 Radial distribution of static pressure in disk cavity

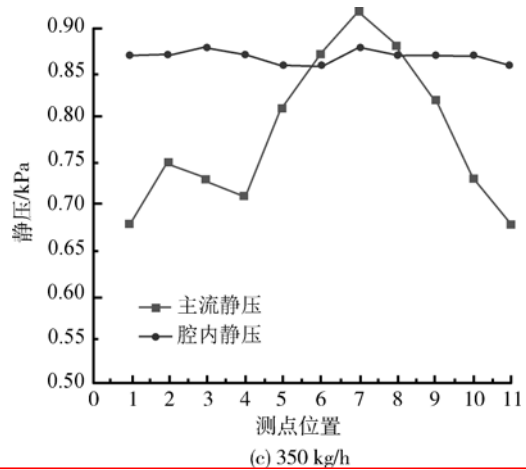
封严质量流量下,在一个叶片通道上的分布情况,就得到图 7.横坐标为压力测点对应的周向位置,纵坐标为静压,旋转工况为 800 r/min,旋转雷诺数 $Re_\phi = 4.69 \times 10^5$,主流雷诺数 $Re_w = 1.069 \times 10^5$.其中比较平稳的“—●—”代表的是腔内位置 D



(a) 150 kg/h



(b) 200 kg/h



(c) 350 kg/h

图 7 盘腔内外静压比较

Fig. 7 Comparison of static pressure data inside and outside the disk cavity

的压力,而有明显波动的“—■—”则是代表封严环外位置 C 的主流压力.需要说明的是,此两处位置并不能严格代表盘腔入口内外的压力,但通过对其比较可获得盘腔封严的一定原理.从图中可以看到,随着封严质量流量的增加,主流压力高于盘腔内压力部分所占的周向区域,以及绝对值都不断减小.封严环内外的压力差正是燃气入侵的动力,图示结果表明在有主流叶片情况下,发生入侵的区域是局部的,且随着冷气流量的提高,入侵的动力和区域都不断减小.这正是提高封严质量流量防止入侵的机理.

3.2 瞬态压力测量结果

本文采用在同一周向位置的 B(即盘腔入口正上方)以及位置 D 分别布置了两支瞬态差压传感器,并用高频信号采集仪对当地压力随时间波动情况进行了记录,采集频率为 4 000 Hz.压力波动情况如图 8 所示.

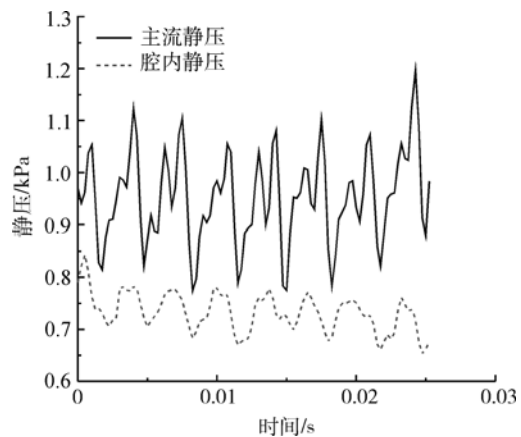


图 8 瞬态静压波动图

Fig. 8 Fluctuation graph of transient static pressure

对位置 B 采集的信号进行傅里叶变换,进行频谱分析,得到图 9. 可以看到 300 Hz 的波动信号非常明显,而在 1000 r/min 的转速下,转盘装有 18 片动叶,动叶扫掠的周期正是 300 Hz. 由图 6 可以得知,驱动燃气入侵的封严环内外压力差,大约在 100 Pa 的量级,而此处动叶扫掠带来的压力波动也达到 100 Pa 量级,因此可以判定,动叶扫掠带来的压力波动,对于燃气入侵的发生有着不可忽略的影响.

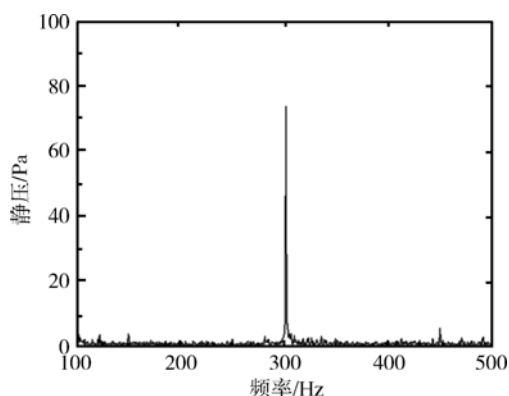


图 9 静压波动信号的频谱分析结果

Fig. 9 Spectrum analysis results of static pressure fluctuation signals

3.3 体积分数实验结果

为获得实验工况下的最小封严质量流量,以及腔内不同位置处的封严效率,本文在盘腔入口处($r/b=0.97$, b 为封严环内壁面半径,见图 10),以及盘腔内各处布置测点,在封严气流中“播种”一定体积分数的二氧化碳,用二氧化碳体积分数

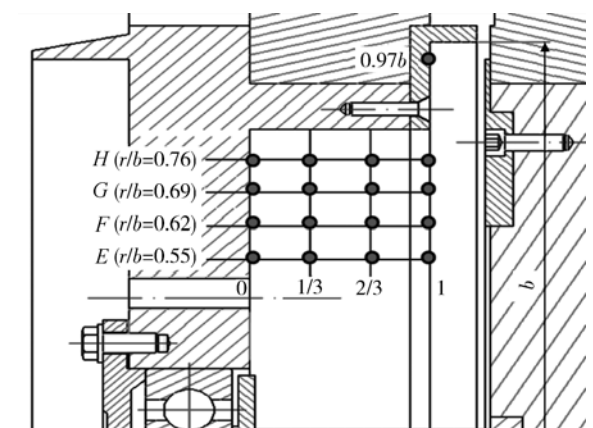


图 10 体积分数实验测点位置分布图

Fig. 10 Location distribution of volume fraction experiment measuring points

分析仪监测测点当地的体积分数. 测点分布如图 10 所示.

图 11 显示的是在 800 r/min 和 1000 r/min 两个旋转工况下,盘腔入口处封严效率随封严流量的变化情况. 若取封严效率为 0.99 时,作为没有发生燃气入侵的标准,则可判定,800 r/min 对应的最小封严质量流量为 300 kg/h,1000 r/min 对应的最小封严质量流量为 350 kg/h.

图 12 显示的是小封严质量流量(100 kg/h)时,位于位置 E、位置 F、位置 G、位置 H 四个不同径向位置处,封严效率随轴向位置变化情况. 其中,图 12(a)和图 12(b)的转速分别为 800 r/min, 1000 r/min. 从图中可以看到四个径向位置处的封严效率都表现为随着轴向位置的增加而增加. 也就是说,在靠近静盘的位置封严效率较低,而在靠近动盘的位置封严效率则较高. 可以据此推断,入侵的燃气进入盘腔后,是沿着静盘壁面流入盘腔深处,然后再与封严冷气进行掺混.

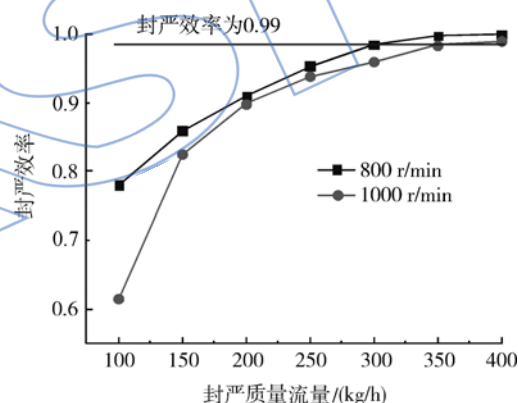
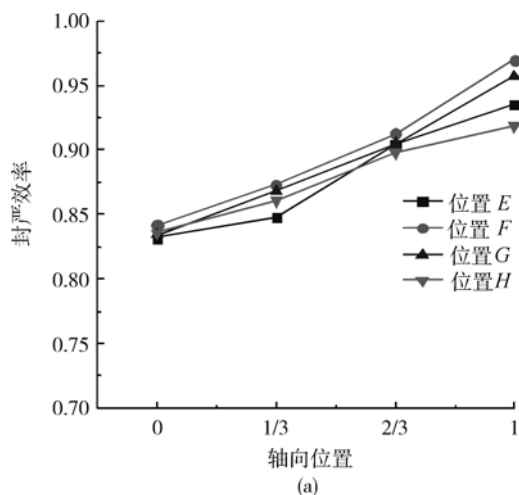


图 11 盘腔入口处封严效率随封严质量流量变化图

Fig. 11 Effect of seal mass flow rate on local sealing effectiveness at entry of the cavity



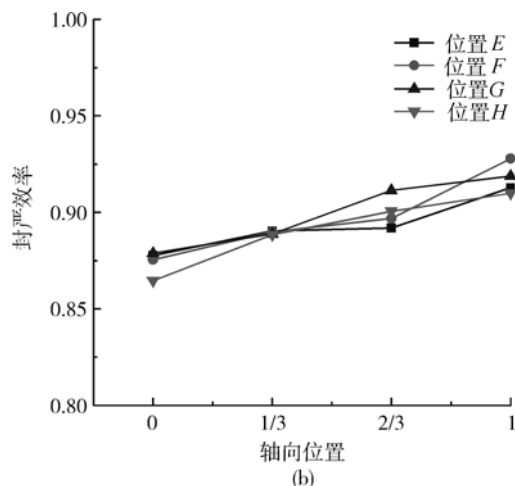


图 12 封严效率随轴向位置变化图

Fig. 12 Axial variation of local sealing effectiveness in the cavity

4 结 论

本文在 1.5 级涡轮实验台上进行了燃气入侵的实验研究,对相关位置的稳态压力、瞬态压力以及封严效率分别进行了测量,获得主流通道的压力,尤其是动静叶干涉对燃气入侵的影响。

1) 稳态压力实验获得了动、静叶之间主流通道的压力分布情况以及盘腔内压力分布情况,也就是封严间隙内、外部的压力情况。封严环内外的压力差异,是造成燃气入侵发生的驱动力。

2) 动叶扫掠带来同频率的压力波动,波动量与封严环内外压力差等量级,对于燃气入侵的发生有着不可忽略的影响。

3) 采用二氧化碳体积分数法来确定盘腔内测点处的封严效率,定量的表征出燃气入侵的大小程度。并得到在较小封严质量流量情况下,入侵的燃气进入盘腔后,是沿着静盘侧流入盘腔,然后再与封严冷气进行掺混。

参考文献:

[1] Campbell D A. Gas turbine disc sealing system design[R].

AGARD-CP-237, 1978.

- [2] Abe T, Kikuchi J, Takeuchi H. An investigation of turbine disc cooling[R]. Vienna: 3rd CIMAC Congress, 1979.
- [3] Kobayashi N, Matsumoto M, Shizuya M. An experimental investigation of a gas turbine disc cooling system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1984, 106(1): 136-141.
- [4] Roy R P, Feng J, Narzary D, et al. Experiments on gas ingestion through axial-flow turbine rim seals[R]. ASME Paper GT-2004-53394, 2004.
- [5] Narzary D, Feng J, Roy R P. Ingestion into a rotor-stator disk cavity with single and double-rim seals[R]. AIAA-2005-3982, 2005.
- [6] Roy R P, Devasenathipathy S, Xu G, et al. A study of the flow field in a model rotor-stator disk cavity[R]. ASME Paper 99-GT-246, 1999.
- [7] Roy R P, Xu G, Feng J. Study of main-stream gas ingestion in a rotor-stator disk cavity[R]. AIAA-2000-3372, 2000.
- [8] Roy R P, Xu G, Feng J, et al. Pressure field and main stream gas ingestion in rotor stator disk cavity[R]. ASME Paper 2001-GT-564, 2001.
- [9] Roy R P, Xu G, Feng J, et al. A study of convective heat transfer in a model rotor-stator disk cavity[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3): 621-632.
- [10] Zhou D, Roy R, Wang C, et al. Main gas ingestion in a turbine stage for three rim cavity configurations[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2009. Orlando, FL, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 1239-1252.
- [11] Bohn D E, Decker A, Ohlendorf N, et al. Influence of an axial and radial rim seal geometry on hot gas ingestion into the upstream cavity of a 1.5-stage turbine[R]. ASME Paper GT-2006-90453, 2006.
- [12] Gallier K D, Lawless P B, Fleeter S. Investigation of seal purge flow effects on the hub flow field in a turbine stage using particle image velocimetry[R]. AIAA-2000-3370, 2000.
- [13] Dierksheide U, Meyer P, Hovestadt T. Endoscopic 2D particle image velocimetry (PIV) flow field measurements in IC engines[J]. Experiments in Fluids, 2002, 33(6): 794-800.
- [14] Owen J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals; Part 1 rotationally-induced ingress[R]. ASME Paper GT-2009-29121, 2009.
- [15] Owen J M. Prediction of ingestion through turbine rim seals; Part 2 externally-induced and combined ingress[R]. ASME Paper GT-2009-29122, 2009.