

叶型接受孔对高位预旋供气系统 流动温降影响的实验研究

龚文彬¹, 刘高文^{1,2}, 王斐³, 李鹏飞¹, 林阿强^{1,2}, 王治武¹

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 710129, 西安; 2. 西北工业大学陕西省航空动力系统热科学重点实验室, 710072, 西安; 3. 中国航空工业集团有限公司中国空空导弹研究院, 471000, 河南洛阳)

摘要: 针对喷嘴与供气孔半径位置不匹配的预旋供气系统, 设计了带有径向倾角的叶型接受孔, 并进行了实验研究。实验同时在静子和转子上测量了系统各关键截面的压力、温度和流量, 并与采用直跑道型接受孔的预旋供气系统性能进行了对比。结果表明: 随流量比的增加, 系统压比逐渐增大, 系统温比逐渐降低; 高流量比条件下, 随旋转马赫数的增加, 系统压比略有增加, 系统温比随之降低; 相较于采用跑道型接受孔的预旋供气系统, 带叶型接受孔的预旋供气系统转子部件的流动损失明显减小; 在设计点工况下, 系统比功耗可降低 23.9%, 系统温降效率可提高 13.7%, 实验条件下的系统温降可达 28.1 K, 系统温降效率可达 0.58。该叶型接受孔的设计思路可为喷嘴与供气孔半径位置不匹配的预旋供气系统进一步提升系统性能提供设计依据。

关键词: 预旋供气系统; 叶型接受孔; 压比; 温比

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107011 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0097-09



OSID 码

Experimental Study on the Influence of Vane-Shaped Receiver Holes on Flow and Temperature Drop of a High-Radius Pre-Swirl Air Supply System

GONG Wenbin¹, LIU Gaowen^{1,2}, WANG Fei³, LI Pengfei¹, LIN Aqiang^{1,2}, WANG Zhiwu¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China; 2. Shaanxi Key

Laboratory of Thermal Science in Aero-engine System, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

3. China Air-to-Air Missile Research Institute, the Aviation Industry Corporation of China, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: For a high-radius pre-swirl system with a radius difference between nozzle and air supply hole, a vane-shaped receiver hole with axial angle was designed. The pressure, temperature and mass flow rate of some critical sections were measured on the stator and rotor, and compared with those of the pre-swirl system using runway-shaped receiver holes. Results show that the system pressure ratio gradually increases and the system temperature ratio decreases as the mass flow ratio increases. While with the rotating Mach number increasing under the condition of large mass flow ratio, the system pressure ratio increases slightly and the system temperature ratio decreases. Compared with the pre-swirl air supply system using runway-shaped receiver holes, the flow resistance of the rotor components is significantly reduced for the pre-swirl air supply system with vane-shaped receiver holes. Under experimental conditions, the

specific work consumption is reduced by 23.9%, the system temperature drop efficiency increases by 13.7%, and the system temperature drop and system temperature drop efficiency reach 28.1 K and 0.58, respectively. The design idea of vane-shaped receiver hole may provide the basis to improve the system performance for a high-radius pre-swirl system with a radius difference between nozzle and air supply hole.

Keywords: pre-swirl air supply system; vane-shaped receiver hole; pressure ratio; temperature ratio

预旋供气系统是为涡轮转子叶片供给足量高品质冷气的系统,在结构上通常包括预旋喷嘴、预旋腔、接受孔、盖板腔、供气孔和内、外封严。一个设计优良的预旋供气系统在保障涡轮转子叶片正常工作的同时,还可有效延长燃气轮机涡轮转子叶片的工作寿命。接受孔作为预旋供气系统重要的组成部件,其性能越来越受到国内外学者的关注。

接受孔可视为一个长径比较小的转动孔,评价转动孔的性能指标也同样适用于接受孔。流量系数^[1]可用于评价接受孔流动损失的大小,接受孔的几何形状、长径比、入口气流角、转速均对接受孔的流量系数具有较大的影响^[1-3]。随着实验测量技术的进步及工程运用的需要,为更好地评估接受孔对预旋供气系统性能的影响程度,一些学者直接将接受孔放进预旋供气系统中进行研究。Chew等测量了接受孔入口的相对总温,并根据实验测量数据验证了简单的预旋腔完全掺混一维流动模型^[4]。Bri-caud等通过3D PIV技术测量了喷嘴出口至接受孔入口之间的流场,并测量了接受孔效率^[5]。数值计算研究作为一种低廉高效的研究工具,在设计、改进研究中的作用也越发突显。为保证数值计算结果的可靠性,Javiya等研究了转静交界面的处理方法、湍流模型的选取以及非稳态效应对数值计算结果的影响^[6-7]。Jarzombek等研究了喷嘴相对接受孔的半径位置,接受孔的边缘形状、倾斜角度、面积比和接受孔数对预旋供气系统流动温降的影响^[8-9]。Lee等通过采用多目标遗传算法对接受孔进行了优化,以提高预旋供气系统的性能^[10]。

国内的学者对接受孔也做了大量的研究工作。在实验研究方面,刘育心等研究了转速、压比、雷诺数对采用直孔型接受孔的预旋供气系统流动温降的影响^[11]。在数值研究方面,朱晓华等发现接受孔入口的旋转比是影响温降效率和压力损失系数的关键因素^[12]。陈帆等研究了接受孔的周向倾角及接受孔的形状对预旋供气系统流动温降的影响^[13-16]。张建超等建立了用于预测接受孔周向速度系数的一维

模型^[17]。

在有关接受孔流动特性的研究中,数值计算的内容相对较多,且所研究的接受孔多为直孔或者斜孔,鲜有学者对采用叶型接受孔的预旋供气系统的性能进行实验研究。本文在西北工业大学旋转盘腔流动换热实验室^[18]所设计的叶型接受孔(半径位置不变)基础上,设计出了带径向倾角的叶型接受孔,在保证接受孔气动性能的同时,又可减少喷嘴与接受孔半径位置不匹配所带来的流动损失。为验证叶型接受孔相较于传统直孔型接受孔的优势,在预旋供气系统转动实验台上,测量了两种不同接受孔形状的预旋供气系统关键截面的压力、温度和流量,并进行了对比。为进一步探索采用叶型接受孔的预旋供气系统性能,研究了不同流量比及转速条件下预旋供气系统的压力和温度特性。

1 参数定义及实验方法

1.1 参数定义

系统压比 π 定义为系统入口总压 p_0^* 和系统出口静压 p_2 之比,表达式为

$$\pi = \frac{p_0^*}{p_2} \quad (1)$$

旋转马赫数为

$$Ma_\varphi = \omega b (kR_g T_0^*)^{-1/2} \quad (2)$$

式中: ω 为转盘角速度; b 为供气孔所在的半径位置; T_0^* 为系统进口总温; k 为定熵指数; R_g 为气体常数。

相对总温为

$$T_{\text{rel}}^* = T + \frac{V_a^2}{2c_p} + \frac{V_r^2}{2c_p} + \frac{(V_\varphi - \omega r)^2}{2c_p} \quad (3)$$

式中: T 为气体静温; V_a 、 V_r 和 V_φ 分别为绝对坐标系下气体的轴向速度、径向速度和周向速度; r 为半径; c_p 为气流比定压热容。绝对总温 T^* 与相对总温 T_{rel}^* 间的关系为

$$T_{\text{rel}}^* = T^* - \frac{(\omega r)^2}{2c_p} (2\beta - 1) \quad (4)$$

式中: β 为气流旋转比($\beta=V_\varphi/\omega r$),是气流周向速度与同半径位置转盘线速度之比。

流量比为

$$q(\lambda)=\frac{m_2}{m_{cr}}\tag{5}$$

式中: m_2 为供气流量; m_{cr} 为喷嘴临界流量。流量比反映了供气流量的大小^[19]。临界流量的关系式如下

$$m_{cr}=0.040\,4p_0^*A_1(T_0^*)^{-1/2}\tag{6}$$

式中: A_1 为喷嘴喉部面积。临界流量是系统在进口总温、总压一定条件下所能达到的最大流量。本实验采用控制流量比的方法进行实验研究。在实验过程中进口总温不变,在同时保证流量比和进口总压与设计工况相等的条件下,供气流量与设计值相等。

系统温降效率 η 定义为系统温降 ΔT 与系统理想温降 ΔT_{id} 之比^[18]

$$\eta=\frac{\Delta T}{\Delta T_{id}}=\frac{T_0^*-T_{rel,2}^*}{T_0^*(1-\pi^{(1-k)/k})}\tag{7}$$

式中 $T_{rel,2}^*$ 为供气孔出口相对总温。

系统温比 τ 定义为供气孔出口相对总温 $T_{rel,2}^*$ 与系统进口总温 T_0^* 之比^[20]

$$\tau=\frac{T_{rel,2}^*}{T_0^*}=1-\frac{2V_{\varphi,1}\omega r_1-\omega^2r_2^2}{2c_pT_0^*}\tag{8}$$

式中: $V_{\varphi,1}$ 和 r_1 分别为喷嘴出口气流周向速度和喷嘴半径。

相较于系统温降效率,系统温比可直观反映出供气孔出口截面的相对总温和系统的温降大小。

系统熵增为

$$\Delta s=c_p\ln(T_2/T_0)-R_g\ln(p_2/p_0)\tag{9}$$

式中: T_2 和 T_0 分别为供气孔出口静温和系统入口静温; p_0 是系统入口静压。其中供气孔出口的静温 T_2 由供气流量 m_2 、出口静压 p_2 、供气孔出口面积 A_2 和出口相对总温 $T_{rel,2}^*$ 获得。由于系统入口动温较小,系统入口静温 T_0 由测得的总温 T_0^* 代替。在不考虑传热的条件下,系统熵增即为系统熵产。

忽略气体与固体壁面间的传热,单位质量流量的系统比功耗可表达为

$$\psi=c_p(T_2^*-T_0^*)\tag{10}$$

式中: T_2^* 为供气孔出口绝对总温。比功耗为负代表气体对壁面做功。

1.2 实验装置及测量方法

1.2.1 实验装置 在西北工业大学预旋供气系统旋转实验台上开展了实验和测量分析。实验系统的构成如图 1 所示,实验系统主要由压气机,储气罐,

进、排气阀门,计算机、电机等设备构成。压气机可提供最高压力为 1.6 MPa、最大流量为 2.5 kg/s 的连续气流。驱动旋转实验台的高速转机利用循环水冷却,最高转速可达 10 000 r/min。静子上测得的压力、温度、流量可通过计算机实时采集;而转子上测得的压力、温度通过与实验台共转的数据记录仪实时存储,实验完成后再导入计算机中进行处理。实验系统的详细介绍可参考文献^[19]。

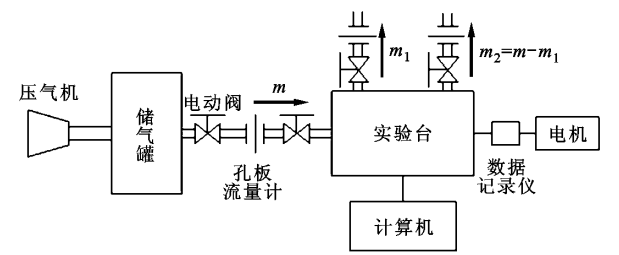


图 1 预旋供气实验系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of the test rig

图 2 给出了高位预旋供气系统实验台的结构示意图。实验台采用轴端中心进气的方法,气流先流入进气腔,然后通过预旋喷嘴膨胀加速后产生高品质的冷气,冷气依次经过预旋腔、接受孔、盖板腔和供气孔,最后流经出气腔排出。安装好的实验台如图 3 所示,实验台中预旋喷嘴、接受孔和供气孔的个数均为 48 个。预旋喷嘴采用叶孔式预旋喷嘴,预旋喷嘴半径与供气孔出口半径之比 r_1/r_2 为 0.961,喷嘴叶高与供气孔出口半径之比 h/r_2 为 0.025 4,喷嘴喉部面积与供气孔出口面积之比 A_1/A_2 为 0.312。

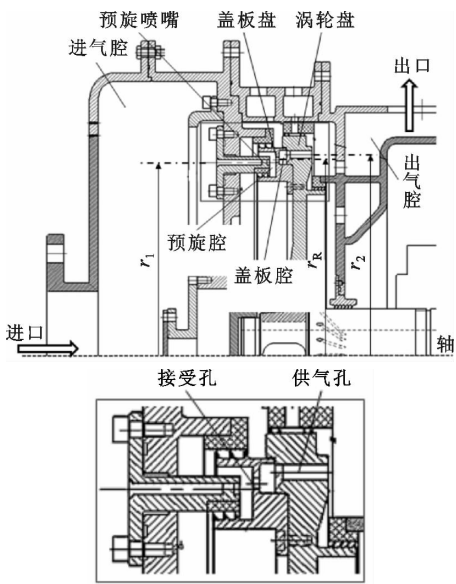


图 2 高位预旋供气系统实验台的结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of the high-radius pre-swirl system

叶型接受孔(VSRH)的结构如图 4 所示,接受孔的径向倾角 $\alpha=65^\circ$,接受孔出口面积与供气孔出口面积之比 A_R/A_2 为 1.086。用于对比的跑道型接受孔(RSRH)的结构如图 5 所示,跑道型接受孔的出口面积与叶型接受孔的出口面积相等。详细的叶型接受孔和跑道接受孔的几何参数如表 1 所示,接受孔的入口半径为 $r_{R,1}$,出口半径为 $r_{R,2}$,轴向长度为 l_3 ,入口孔长度为 l_1 ,出口孔长度为 l_2 ,孔宽度为 w ,圆角半径为 R 。在实验过程中,进口总温约为 296 K,调节旋转马赫数时,保证进口总压不变,通过调节外封严流量来保证流量比不变;调节流量比时,保证外封严占比和旋转马赫数不变,通过调节进口总压,使流量比达到给定值,即在保证背压不变的条件下,通过调节系统压比来调节流量比。进口总压的取值范围为 110~165 kPa,流量比的变化范围为 0.39~0.67,旋转马赫数的变化范围为 0.37~0.58。

表 1 叶型和跑道接受孔的几何参数

Table 1 Geometric parameters of different receiver holes

归一化尺寸	数值	
	叶型接受孔	跑道型接受孔
$r_{R,1} \cdot r_2^{-1}$	0.967	0.974
$r_{R,2} \cdot r_2^{-1}$	1.000	0.974
$l_1 \cdot r_2^{-1}$	0.071	0.041
$l_2 \cdot r_2^{-1}$	0.038	
$l_3 \cdot r_2^{-1}$	0.070	0.019
$w \cdot r_2^{-1}$	0.032	0.032
$R \cdot r_2^{-1}$	0.006	0.013

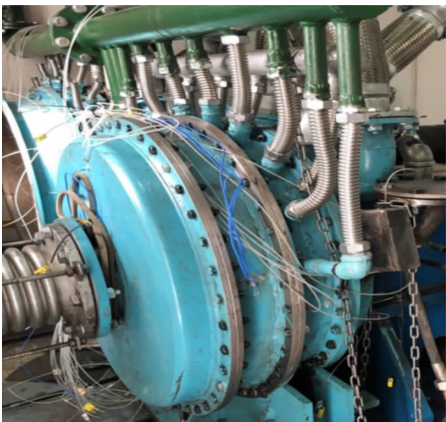


图 3 安装好的高位预旋供气系统实验台

Fig. 3 Test rig of the high-radius pre-swirl system

1.2.2 测点布置及压力校准 在实验台的静止部件及转动部件上布置压力、温度测点,在实验台进、出口布置流量测点。在进气腔布置 1 个总温测点和 2 个总压测点;在预旋喷嘴出口布置 4 个静压测点;

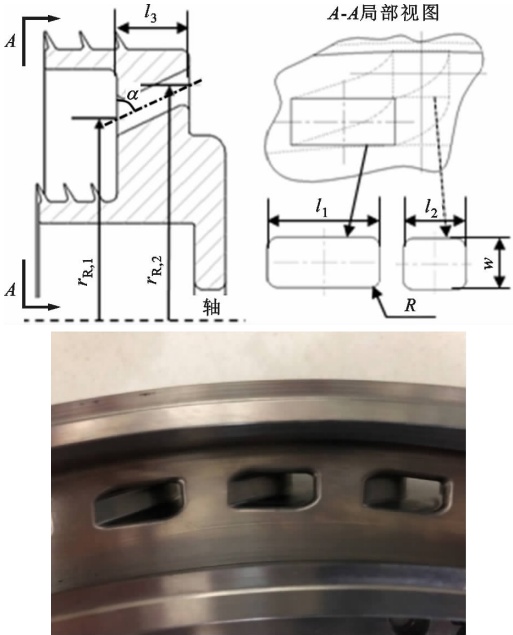


图 4 叶型接受孔的二维示意图和实验件

Fig. 4 Two-dimensional diagram of the vane-shaped receiver hole and test assembly

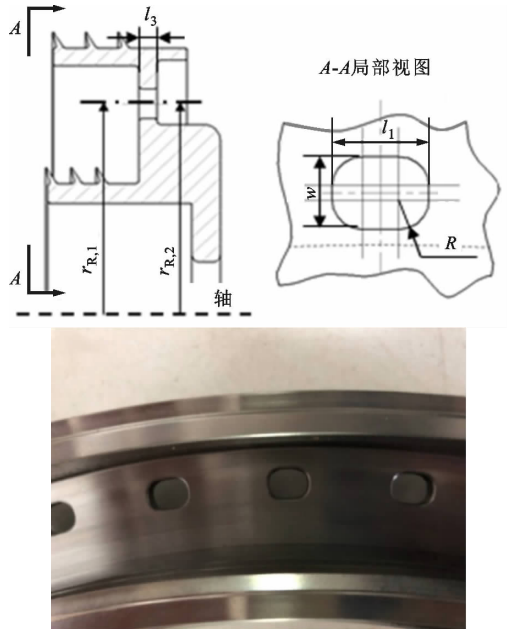


图 5 跑道型接受孔的二维示意图和实验件

Fig. 5 Two-dimensional diagram of the runway-shaped receiver hole and test assembly

在接受孔出口布置 2 个静压测点和 3 个相对总温测点;在供气孔入口布置 2 个静压测点,在供气孔出口布置 2 个静压测点、2 个相对总温测点和一个绝对总温测点。实验台接受孔出口静压、供气孔进口和出口静压以及相对总温的测量均在转子上进行。实验台的温度均通过 K 型热电偶测得,经陕西计量院

标定后的测量精度为 1 K。静止部件上的压力通过 0.05%精度的 PSI 压力扫描阀测得,转动部件的压力通过 Kulite™ 微型传感器测得。外封严流量和喷嘴流量均通过孔板流量计测得,经陕西计量院标定后的流量测量精度为 1%。供气流量可通过将喷嘴流量和外封严流量作差获得。详细的测点布置方法及位置可参考文献[19]。

图 6 给出了分别在 4 800 和 7 500 r/min 两个转速下接受孔出口、供气孔入口和供气孔出口的 Ku-lite™ 微型传感器的压力实验标定结果。图中的 p_K 代表 Kulite™ 传感器测得的压力, p_s 代表压力扫描阀测得的压力, RO、SI 和 SO 分别代表接受孔出口、供气孔入口和供气孔出口,压力标定方法可参考文献[19]。标定后的 Kulite™ 微型传感器的压力测量值与压力扫描阀的压力测量值之间的相关系数可达到 0.99 以上。校准后, Kulite™ 微型传感器在实验压力测量范围内的测量最大误差为 0.4%。

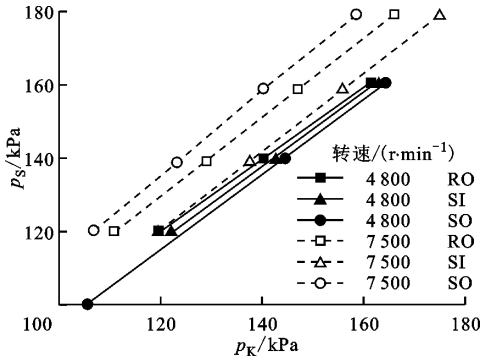


图 6 Kulite™ 压力传感器压力实验标定结果
Fig. 6 Calibration of Kulite™ pressure sensor

2 结果与讨论

2.1 叶型和跑道型接受孔性能对比

为对比叶型接受孔与直孔型接受孔两者的性能优劣,在图 3 所示的预旋转动实验台上,对叶型接受孔与跑道型接受孔展开了实验研究。实验测量了两者在设计工况下(供气压力均为 100 kPa,系统压比分别为 1.6 和 1.9,对应的旋转马赫数分别为 0.54 和 0.53)各个关键截面的静压、温度以及流量。

图 7 给出了叶型接受孔与跑道型接受孔在设计工况下各截面静压比的对比。与采用跑道型接受孔的高位预旋供气系统相比,采用叶型接受孔时,喷嘴出口压力与采用跑道型接受孔时的喷嘴出口压力基本一致,但盖板腔内没有明显的压力升高现象,接受孔出口与供气孔入口的压力较低。刘育心在对采用

叶型接受孔的低位预旋供气系统数值研究时也得到了同样的结果^[18]。

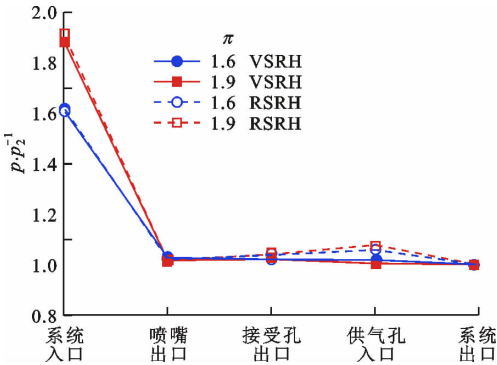


图 7 系统内各截面静压比的对比
Fig. 7 Comparison of static pressure ratios at different critical cross-sections

表 2 给出了分别采用叶型接受孔和跑道型接受孔的预旋供气系统在压比为 1.6 和 1.9 的两个设计点工况下的比功耗和温降的实验测量结果。表 2 中的比功耗为负值代表气流对转盘做功。在设计工况下,相较于采用跑道型接受孔的预旋供气系统,采用叶型接受孔时的预旋腔压力基本不变,系统比功耗明显降低,系统温降和温降效率明显增加。系统压比为 1.6 和 1.9 时的系统比功耗分别降低了 23.9% 和 41.2%,系统温降分别增加了 3.4 K 和 3.1 K,温降效率分别增加了约 14.6% 和 13.7%,实验条件下的最大系统温降可达 28.1 K,系统温降效率可达 0.58。图 8 给出了两个设计工况下采用两种不同接受孔时系统熵产的对比如。从图 8 可以看出,采用叶型接受孔时系统熵产明显降低,说明采用表 2 采用叶型和跑道型接受孔时系统功耗和温降的对比

Table 2 Comparison of system specific work consumption and system temperature drop for different receiver holes

评价指标	数值			
	叶型接受孔		跑道型接受孔	
系统压比	1.6	1.9	1.6	1.9
旋转马赫数	0.54	0.53	0.54	0.53
流量比	0.63	0.97	0.63	0.97
预旋腔压力/kPa	102.8	112.6	102.1	111.6
比功耗/(kW·(kg·s ⁻¹) ⁻¹)	-5.17	-6.99	-4.17	-4.95
温降/K	22.8	28.1	19.4	25.0
温降效率/%	58.2	55.5	50.8	48.8

叶型接受孔时转子部分的流动损失明显减小,降低了转子温升,进而增大了系统温降。

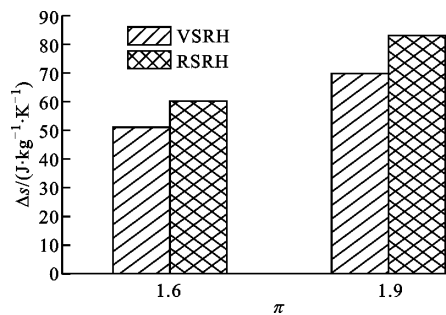


图8 两个设计工况下采用两种不同接受孔时系统熵产的对比

Fig. 8 Comparison of system entropy increment in two design conditions between two shapes of receiver hole

由上文的分析可知,相较于直孔型接受孔,叶型接受孔具有更为优异的气动性能。为进一步探索采用叶型接受孔的预旋供气系统的性能,在图3所示的预旋转动实验台上,进行了该预旋供气系统的流动温降特性研究。实验中系统出口静压为100 kPa,流量比的变化范围为0.39~0.67,旋转马赫数的变化范围为0.37~0.58。

2.2 流量比对系统流动温降的影响

图9和图10分别给出了采用叶型接受孔的预旋供气系统的系统压比和系统温比随流量比 $q(\lambda)$ 变化的实验测量结果。从图9中可以看出,随流量比的增加,系统压比逐渐增大,相较于 $q(\lambda)=0.39$ 时的喷嘴压比,不同旋转马赫数下系统压比的增幅约为43.2%。在实验流量比的变化范围内,最大系统压比为1.70。由图10可知,系统温比随流量比增加而降低,且系统温比始终小于1,表示预旋供气系统产生了温降。实验测得的系统温比的变化范围为0.924~0.994之间,对应的系统温降在1.9~

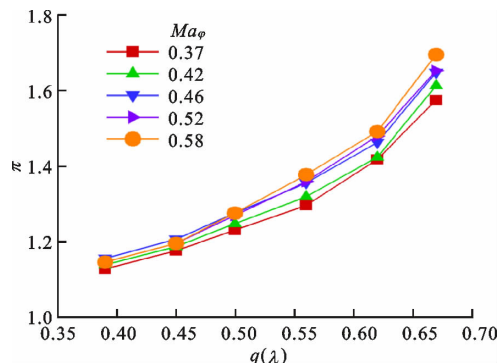


图9 系统压比随流量比变化的实验结果

Fig. 9 Variation of system pressure ratio with mass flow ratio

22.4 K。当旋转马赫数为0.46时,系统温比的降幅约为5.0%,对应实验状态下的系统温降增加了约9.8 K。

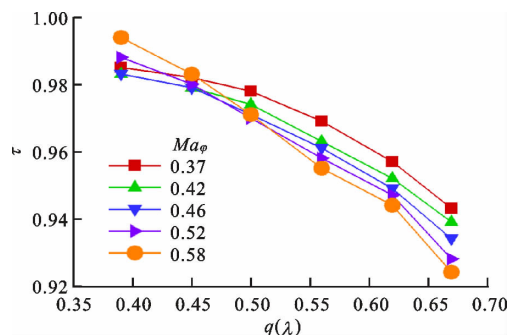


图10 系统温比随流量比变化的实验结果

Fig. 10 Variation of system temperature ratio with mass flow ratio

图11给出了系统温降效率 η 随流量比 $q(\lambda)$ 变化的实验结果。从图中可以看出,随流量比的增加,系统温降效率大致呈增加的趋势。在流量大于0.45时,系统温降效率均大于0.33,系统温降效率最高可达0.54。在旋转马赫数 Ma_ϕ 为0.46时,流量比从0.39增加到0.67,温降效率增加了21.8%。在流量比 $q(\lambda)$ 为0.39、 Ma_ϕ 为0.58时的系统温降效率远低于其他工况下系统温降效率。这是因为在小流量比时喷嘴出口速度较小,在高旋转马赫数下接受孔入口前的旋转比远小于1,造成预旋供气系统流动损失较大。

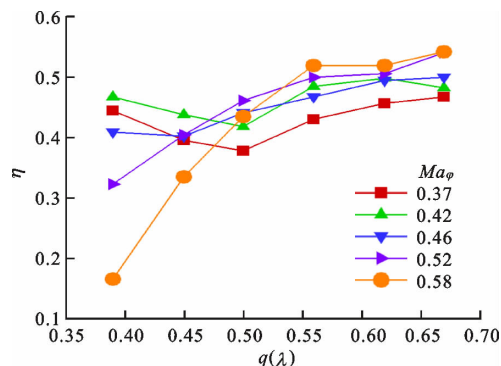


图11 温降效率随流量比变化的实验结果

Fig. 11 Variation of temperature drop efficiency with mass flow ratio

2.3 旋转马赫数对系统流动温降的影响

图12和图13分别给出了采用叶型接受孔的预旋供气系统的系统压比和系统温比随旋转马赫数 Ma_ϕ 变化的实验测量结果。从图12中可以看出,随旋转马赫数的增加,系统压比总体上呈现出逐渐增大的趋势,流量比为0.5时,系统压比的增幅约为

3.2%。由图 13 可知,随旋转马赫数的增加,大流量比条件下,系统温比呈现出下降的趋势。由式(8)可知,最小系统温比对应的转速为 $30V_{\varphi,1}r_1/(\pi r_2^2)$,大流量比条件下,实验转速小于此转速,故系统温比随转速的增加而降低。小流量比条件下,系统温比随转速的增加呈现出先减小后增加的趋势。

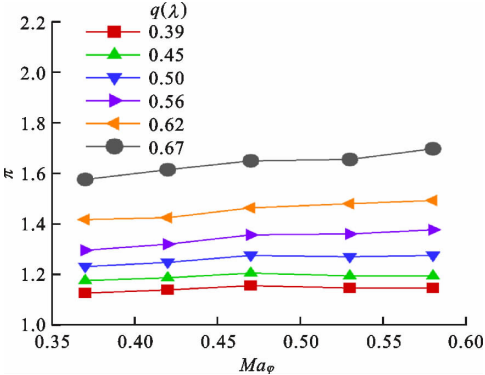


图 12 系统压比随旋转马赫数变化的实验结果
Fig. 12 Variation of system pressure ratio with Ma_φ

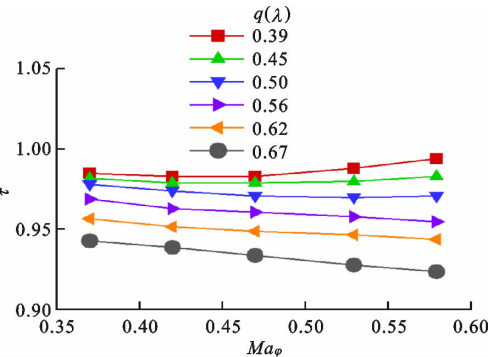


图 13 系统温比随旋转马赫数变化的实验结果
Fig. 13 Variation of system temperature ratio with Ma_φ

图 14 给出了系统温降效率 η 随旋转马赫数 Ma_φ 变化的实验结果。从图中可以看出,随旋转马赫数的增加,不同流量比下的系统温降效率的变化规律有所差异。在流量比 $q(\lambda)$ 小于 0.5 时,系统温降效率随旋转马赫数的增加而降低,最小系统温降效率为 0.165,相较同流量比条件下 Ma_φ 为 0.37 时的系统温降效率,降低了 62.8%。这是由于流量比一定时,喷嘴出口速度基本不变,小流量比条件下接受孔前的旋转比始终小于 1,随旋转马赫数的增加,接受孔入口前的旋转比逐渐减小,会导致转动部件内的流动损失随之增大,进而使转动部件的温升增大,系统温降效率降低。流量比足够大时,系统温降效率随旋转马赫数的增加而增大,最大系统温降效率达到了 0.54,最大增幅约为 20.7%。这是由于流量比足够大时,接受孔入口前的旋转比始终大于 1,

旋转马赫数的增加使接受孔入口前的旋转比逐渐接近 1,转动部件内的流动损失降低,系统温降效率增大。

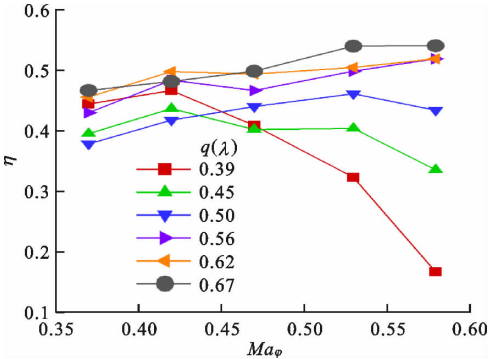


图 14 温降效率随旋转马赫数变化的实验结果
Fig. 14 Variation of temperature drop efficiency with Ma_φ

对比图 11 和图 14 可知,对于采用叶型接受孔的预旋供气系统,流量比和旋转马赫数分别在不同的阶段对温降效率的变化起着主导作用。在流量比较小小时,旋转马赫数对温降效率的影响更大;在流量比 $q(\lambda)$ 为 0.39 时,随旋转马赫数的增加,温降效率降低了 63%。在旋转马赫数 Ma_φ 足够大时,流量比对温降效率的影响更大;在旋转马赫数 Ma_φ 为 0.58 时,随流量比的增加,温降效率增加了 127%。实质上,温降效率反映的是流动损失的相对大小,而对于预旋供气系统而言,转动件和静止件之间的流动不匹配所造成的流动损失往往最大。流量比和旋转马赫数分别决定着静止件和转动件的流动状况,因此,温降效率的变化趋势受两者相对大小的影响。

3 结 论

本文实验研究了叶型接受孔对预旋供气系统流动温降特性的影响,并与采用跑道型接受孔的预旋供气系统的性能进行了对比,经过分析可以得出如下结论。

(1)与采用跑道型接受孔的预旋供气系统相比,采用叶型接收孔时预旋供气系统的性能明显提升。在系统压比为 1.6 和 1.9 的两个设计点工况下,系统比功耗分别降低了 23.9% 和 41.2%;系统温降效率分别增加了约 14.6% 和 13.7%,设计工况下的系统温降效率最高可达 0.58。

(2)随流量比的增加,系统压比逐渐增大,系统温比逐渐减小,系统温降效率逐渐增大。随旋转马赫数的增加,系统压比略有增加,系统温比逐渐减小,小流量比条件下系统温降效率逐渐降低,大流量比条件下系统温降效率逐渐增加。

(3)对预旋供气系统进行设计优化时,气动性能良好的叶型接受孔可大幅提升预旋供气系统的性能。因此,在对预旋供气系统性能有较大需求的工程设计中,可针对接受孔元件进行详细的气动设计,以进一步提升系统性能。

参考文献:

- [1] PHILIP F M, ANDREW J S. Experimental study of flow through moving orifices [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1965, 87(4): 1082-1083.
- [2] WITTIG S, KIM S, JAKOBY R, et al. Experimental and numerical study of orifice discharge coefficients in high speed rotating disks [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1996, 118(2): 400-407.
- [3] MAENG D J, LEE J S, JAKOBY R, et al. Characteristics of discharge coefficient in a rotating disk system [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1998, 121(4): 663-669.
- [4] CHEW J W, HILLS N J, KHALATOV S, et al. Measurement and analysis of flow in a pre-swirl cooling air delivery system [C]//*Proceedings of the ASME Turbo Expo: Collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*. New York, USA: ASME, 2003: 913-920.
- [5] BRICAUD C, GEIS T, DULLENKOPF K, et al. Measurement and analysis of aerodynamic and thermodynamic losses in pre-swirl system arrangements [C]//*Proceedings of the 2007 ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. New York, USA: ASME, 2007: 1115-1126.
- [6] JAVIYA U, CHEW J W, HILLS N. CFD analysis of flow and heat transfer in a direct transfer pre-swirl system [C]//*Proceedings of the ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. New York, USA: ASME, 2010: 1167-1178.
- [7] KARNAHL J, VON WOLFERSDORF J, THAM K M, et al. CFD simulations of flow and heat transfer in a pre-swirl system: influence of rotating-stationary domain interface [C]//*Proceedings of the 2011 ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. New York, USA: ASME, 2011: 665-677.
- [8] JARZOMBK K, DOHMEN H J, BENRA F K, et al. Flow analysis in gas turbine pre-swirl cooling air systems: variation of geometric parameters [C]//*Proceedings of the 2006 ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. New York, USA: ASME, 2006: 1403-1411.
- [9] LEE Jungsoo, LEE Hyungyu, KIM Donghwa, et al. The effect of rotating receiver hole shape on a gas turbine pre-swirl system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(5): 2179-2187.
- [10] LEE Hyungyu, CHO Geonhwan. Optimization of receiver hole to improve discharge coefficient and temperature drop effectiveness of gas turbine pre-swirl system using CFD analysis [J]. *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, 2019, 22(6): 45-55.
- [11] 刘育心, 刘高文, 孔晓治, 等. 叶型预旋喷嘴流动及温降特性实验与计算研究 [J]. *推进技术*, 2019, 40(4): 815-824.
- LIU Yuxin, LIU Gaowen, KONG Xiaozhi, et al. Experimental testing and numerical analysis on flow characteristics and cooling performance for two vane pre-swirl nozzles [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(4): 815-824.
- [12] 朱晓华, 刘高文, 刘松龄, 等. 带盖板的预旋系统温降和压力损失数值研究 [J]. *航空动力学报*, 2010, 25(11): 2498-2506.
- ZHU Xiaohua, LIU Gaowen, LIU Songling, et al. Numerical studies of temperature drop and pressure loss in a cover-plate preswirl system [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2010, 25(11): 2498-2506.
- [13] 陈帆, 王锁芳, 张光宇, 等. 接受孔角度对预旋系统流动特性影响的数值研究 [J]. *推进技术*, 2018, 39(7): 1549-1555.
- CHEN Fan, WANG Suofang, ZHANG Guangyu, et al. Numerical study on effects of receiver holes angles on flow characteristics of pre-swirl system [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(7): 1549-1555.
- [14] 张凯, 王锁芳, 侯晓亭, 等. 狭缝型接受孔对径向预旋系统的影响 [J]. *航空动力学报*, 2020, 35(5): 983-991.
- ZHANG Kai, WANG Suofang, HOU Xiaoting, et al. Influence of slit type receiver holes on radial pre-swirl system [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2020, 35(5): 983-991.
- [15] 郑笑天, 王锁芳, 韦光礼. 接受孔形状对预旋供气系统内气流流动影响研究 [J]. *推进技术*, 2020, 41(10): 2222-2227.
- ZHENG Xiaotian, WANG Suofang, WEI Guangli. Effects of receiver hole shape on air flow in pre-swirl air supply system [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(10): 2222-2227.
- [16] 侯伟韬, 王新军, 李炎栋. 接收孔周向倾角对预旋转静盘腔流动特性的影响 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(11): 27-33.
- HOU Weitao, WANG Xinjun, LI Yandong. Influence

of the circumferential inclination of receiver holes on the flow characteristics of the pre-swirl rotor-stator cavity [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(11): 27-33.

- [17] 张建超,王锁芳,王春风,等. 接受孔对预旋系统温降特性的影响 [J]. 重庆理工大学学报, 2014, 28(3): 50-57.

ZHANG Jianchao, WANG Suofang, WANG Chunfeng, et al. Influences of receiver hole on temperature reduction characteristic of pre-swirl system [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(3): 50-57.

- [18] LIU Yuxin, LIU Gaowen, KONG Xiaozhi, et al. Design and numerical analysis of a vane shaped receiver hole in a cover-plate pre-swirl system [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2019, 141: 041001.

- [19] 吴衡,刘高文,冯青,等. 盖板式预旋系统的压比和熵增特性 [J]. 推进技术, 2019, 40(10): 2252-2260.

WU Heng, LIU Gaowen, FENG Qing, et al. Pressure ratio and entropy increment in a cover-plate pre-swirl system [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(10): 2252-2260.

- [20] 雷昭,刘高文,吴衡,等. 盖板式预旋系统温降特性的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(8): 2036-2043.

LEI Zhao, LIU Gaowen, WU Heng, et al. Experimental investigation on the temperature drop of a cover-plate pre-swirl system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(8): 2036-2043.

[本刊相关文献链接]

张垲垣,李志刚,李军. 透平端壁冷却及泛冷却最优的端壁造型设计研究. 2021, 55(5): 1-9. [doi: 10. 7652/xjtuxb202105001]

王天昊,李志刚,李军. 采用 Bulk-Flow 模型的直通式迷宫密封转子动力特性研究. 2021, 55(5): 25-33. [doi: 10. 7652/xjtuxb202105004]

侯伟韬,王新军,李炎栋. 接收孔周向倾角对预旋转静盘腔流动特性的影响. 2019, 53(11): 27-33. [doi: 10. 7652/xjtuxb201911004]

赵家毅,王志恒,席光,等. 大预旋下离心压缩机进口结构与导叶掠角的改进研究. 2017, 51(11): 1-6. [doi: 10. 7652/xjtuxb201711001]

陈尧兴,李志刚,李军. 非均匀进汽时迷宫密封汽流激振动力特性的研究. 2017, 51(9): 145-152. [doi: 10. 7652/xjtuxb201709021]

李志刚,李军,丰镇平. 进口防旋板对孔型密封非定常气流激振特性的影响. 2016, 50(1): 16-21. [doi: 10. 7652/xjtuxb201601003]

王世柱,李志刚,李军,等. 补汽对透平级气动性能和静叶汽封转子动力特性影响的数值模拟. 2015, 49(5): 56-61. [doi: 10. 7652/xjtuxb201505009]

马斌,孙皖,赖天伟,等. 波箔箔片动压气体轴承的实验研究. 2014, 48(1): 118-122. [doi: 10. 7652/xjtuxb201401020]

褚晓广,张承慧,李珂,等. 涡旋膨胀机改造及试验性能研究. 2014, 48(1): 37-41. [doi: 10. 7652/xjtuxb201401007]

刘家郡,江海,尤晖,等. 超声悬浮-气浮混合式悬浮的承载力特性研究. 2013, 47(5): 56-60. [doi: 10. 7652/xjtuxb201305010]

(编辑 武红江)