

叶型孔式预旋喷嘴流动特性数值研究*

刘育心¹, 刘高文¹, 吴 衡¹, 田淑青²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;

(2. 中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

摘 要: 现有研究表明叶片式喷嘴是目前为止性能最好的预旋喷嘴。而在整环的喷嘴盘设计中, 当喷嘴总面积、预旋角度、喷嘴数目和半径位置确定后, 喷嘴叶高和栅距就固定下来, 往往因为叶高与栅距的比值过小而大大降低喷嘴性能。在叶片式喷嘴基础上提出了一种能够调整喷嘴叶高到恰当值的新型预旋喷嘴——叶型孔式喷嘴 (vane shaped hole nozzle, vsh nozzle)。采用数值方法深入对比研究了叶型孔式喷嘴与叶片式喷嘴的性能差异。为了考虑喷嘴下游预旋腔的掺混影响, 计算域不仅包括静止的进气腔和喷嘴, 还包括转动的预旋腔和接受孔。计算结果表明, 叶型孔式预旋喷嘴的流量系数和预旋效率显著高于叶片式喷嘴, vsh-52喷嘴的流量系数比vane-52喷嘴高9.14%, 预旋效率高4.44%。还提出采用有效流量系数、有效预旋效率两个参数来体现考虑喷嘴下游预旋腔掺混影响的喷嘴综合性能。

关键词: 预旋系统; 预旋喷嘴; 叶片; 流量系数; 预旋效率

中图分类号: V231

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2016) 02-0332-07

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2016. 02. 018

Numerical Investigation on Flow Characteristics of a Vane Shaped Hole Preswirl Nozzle

LIU Yu-xin¹, LIU Gao-wen¹, WU Heng¹, TIAN Shu-qing²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Poly-Technical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, Shanghai 201108, China)

Abstract: Investigations on preswirl nozzle show that the cascade vane nozzle is the best one so far. While in the design of whole circular nozzle disc, the blade height and blade spacing will be settled with the throat area, preswirl angle, number and radial position of nozzle decided. If the ratio between blade height and blade spacing is too small, it will reduce the performance of nozzle significantly. Based on the vane nozzle, a new kind of preswirl nozzle called vane shaped hole preswirl nozzle (vsh nozzle for short) is proposed, with which the ratio of blade height against blade spacing can be adjusted to a more appropriate value. The flow characteristics of vane nozzle and vane shaped hole nozzle are compared numerically. To consider the mixing influence of preswirl cavity downstream the nozzle, the computational models contain not only the stationary inlet chamber and preswirl nozzle, but also the rotary preswirl cavity and receiver hole. Results show that the discharge coefficient and preswirl effectiveness of the vsh nozzle are higher remarkably than that of vane nozzle. The discharge coefficient of the vsh-52 preswirl nozzle increased by 9.14% comparing with that of the vane-52 nozzle, and the preswirl effectiveness increased by about 4.44%. Two new parameters called effective discharge coefficient and effective preswirl effectiveness are also proposed to reflect the comprehensive performance considering the mixing

* 收稿日期: 2014-10-13; 修订日期: 2014-12-17。

基金项目: 国家自然科学基金 (51476133)。

作者简介: 刘育心, 女, 博士, 研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动换热。E-mail: liuyuxin_lz@163.com

通讯作者: 刘高文, 男, 博士, 副教授, 研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动换热。E-mail: gwliu@nwpu.edu.cn

influence of preswirl cavity downstream the nozzle.

Key words: Preswirl system; Preswirl nozzle; Vane; Discharge coefficient; Preswirl effectiveness

1 引言

预旋系统作为向发动机转子叶片提供适宜压力、温度和流量冷却气体的部件系统,因具有巨大的降温潜力而成为近年来国内外发动机空气系统领域的研究热点。随着人们对预旋系统的深入研究,发现预旋喷嘴在系统中起着至关重要的作用,其性能优劣直接关系到预旋系统的温降效果。因此,对预旋喷嘴的研究和优化越来越受到国内外的广泛重视。

Meierhofer B 和 Franklin C J^[1]研究了预旋喷嘴数目、喷嘴高度和截面形状、喷嘴出口的间距等因素的影响,并首先提出了预旋效率这一概念。Ditaman^[2]等对直接式预旋系统中的流量系数进行了试验和数值研究,该研究的数值计算结果和实验结果符合良好,并且预旋孔和接收孔流量系数的单独研究得出转速对预旋孔流量系数影响较小。Gei等^[3]有关预旋温降的试验研究,详细给出了试验方法及相对总温定义,得出喷嘴内损失、预旋腔内的掺混损失会显著降低冷却效率,并根据实验数据建立了半经验模型和延伸模型。文献[4]深入研究了预旋系统的气体动力损失和热力学损失,就喷嘴和接收孔的面积及外形等几何结构变化对流动和换热的影响进行了研究。结果发现:转速、预旋腔的大小和预旋孔的数量对预旋孔的流量系数没有显著影响,而压比和预旋孔进口几何形状是主要影响因素。Lewis等^[5]研究了预旋喷嘴径向位置对直接式预旋系统流动特性的影响。Yan等^[6]对直接式预旋系统的流动特性进行了实验和数值研究,研究发现从喷嘴出口到腔内气流核心区有很大的压力损失,并且腔内核心气流的旋转比明显比喷嘴出口的旋转比要低。Javiya等^[7]对预旋角度均为 12° 的圆柱型预旋孔、气动孔及叶片式预旋喷嘴进行了对比研究,结果发现叶片式预旋喷嘴的降温效果最好,其流量系数可以达到0.93;气动孔次之,流量系数约为0.9;而圆柱型预旋孔性能最差,流量系数仅有0.73。

在国内,文献[8~11]对转静盘腔换热和流动进行了大量的数值和实验研究。在预旋系统和预旋喷嘴方面,文献[12]分别用数值和实验的方法研究了有盖板的预旋系统中旋转雷诺数、旋转比等参数对预旋系统温降的影响,数据显示旋转比是主要影响

因素。文献[13]研究了预旋角度对预旋孔流动特性的影响,得出预旋效率随预旋角度的减小而显著增大的结论。文献[14]分别用实验和数值方法对预旋角度均为 20° 的直孔型和扩口孔型喷嘴进行了对比研究,结果表明计算结果与实验结果符合良好,扩口孔流量系数、预旋效率和系统温降都比直孔显著增大20%以上。文献[15]对比了直孔型喷嘴、扩口孔型喷嘴以及叶片式喷嘴的性能,结果显示叶片式喷嘴的流量系数和预旋效率显著高于直孔型喷嘴和扩口型喷嘴,压比1.9时其流量系数可以达到0.914。文章还研究了无量纲叶高对喷嘴性能的影响,得出结论喷嘴流量系数随无量纲叶高的增大先增大后基本不变。

现有研究表明,叶片式喷嘴是目前为止性能最好的预旋喷嘴。而在整环的喷嘴盘设计中,当喷嘴总面积、预旋角度、喷嘴数目和半径位置确定后,喷嘴叶高和栅距就固定下来,往往因为叶高与栅距的比值过小而大大降低喷嘴性能。因此本文在叶片式喷嘴基础上提出了一种能够调整喷嘴叶高到恰当值的新型预旋喷嘴——叶型孔式喷嘴(Vane shaped hole preswirl nozzle 简称 vsh nozzle)。本文深入对比研究了叶型孔式喷嘴与叶片式喷嘴的性能差异,并将下游预旋腔掺混对喷嘴的影响考虑在内,提出了能够反映喷嘴综合性能的无量纲参数。

2 计算模型与计算方法

在本文中,首先保证叶片式喷嘴和叶型孔式喷嘴除喷嘴几何结构外,其余参数完全一致,即保证喷嘴总流通面积均为 650mm^2 ,喷嘴半径均为 170mm ,整环喷嘴数目为52,喷嘴预旋角度均为 10° 。

2.1 喷嘴结构及几何参数

根据上述给定条件,可确定叶片式喷嘴(vane-52)的栅距和叶高,此时无量纲叶高(叶高与栅距之比)为0.177,无量纲弦长(弦长与栅距之比)为0.8,安装角 27° 。叶片式喷嘴示意图如图1(a)所示,其中 L 表示叶片轴向弦长, t 为栅距, θ 为预旋角度。

此时 vane-52 的无量纲叶高仅有0.177,由文献[15]知无量纲叶高小于0.5时,端壁二次涡流影响较大,会导致喷嘴流量系数显著降低。可见,虽然可以设计出性能很好的叶片式喷嘴,但在实际应用中却因为喷嘴半径、预旋角度和数目等因素的限制,无

法达到理想设计值。

因此,本文在汽轮机中部分进气方式^[16~18]的启发下,提出了一种新型式的预旋喷嘴——叶型孔式喷嘴,具体结构如图1(b)所示,这里 t 为喷嘴流道宽度。叶型孔式喷嘴是将叶片式喷嘴的吸力面、压力面分开,中间形成一段固体域,宽度记为 s 。在保证喷嘴喉部面积一定的条件下,通过增加固体域即可灵活地调整喷嘴的无量纲叶高。这样就可以在流道型面仍然是气动性能很好的叶片吸力面、压力面的条件下,将vane-52喷嘴的无量纲叶高0.177提高至最佳值0.5,形成叶型孔式喷嘴vsh-52。两种形式喷嘴的出口截面图如图2所示。其中黑色为叶片式喷嘴vane-52轮廓线,蓝色为叶型孔式喷嘴vsh-52轮廓线,蓝色剖面线部分即为固体域。从图中可以直观的看到,在面积不变的条件下,将叶片式喷嘴狭长的通道调整为无量纲叶高为0.5的通道。

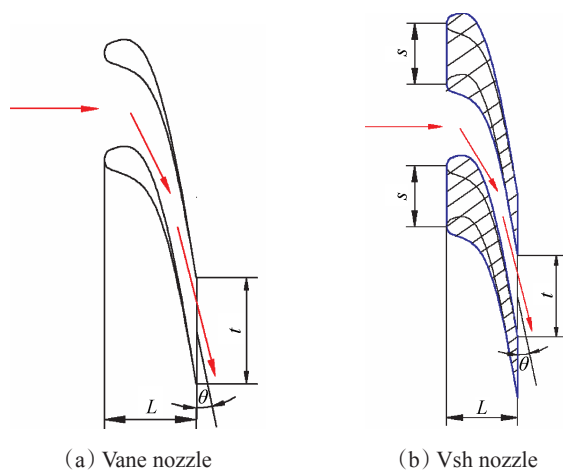


Fig. 1 Parameters definition of Preswirl nozzle

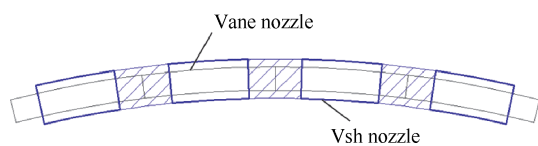
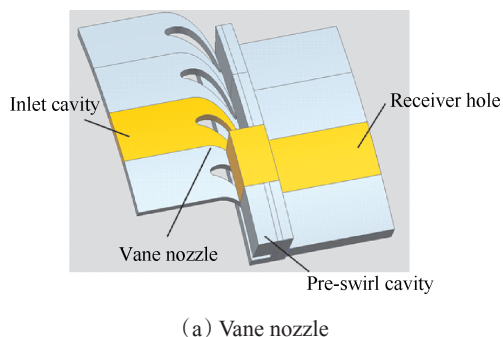
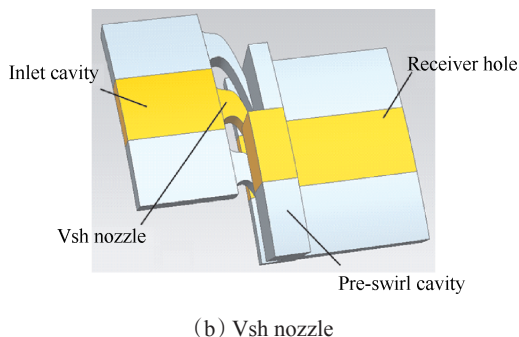


Fig. 2 Profile on the outlet section of preswirl nozzle



(a) Vane nozzle



(b) Vsh nozzle

Fig. 4 Simplified computational field of the preswirl nozzle

2.2 计算模型

预旋系统的实物模型包括预旋喷嘴、预旋腔、接受孔、盖板腔、叶片供气孔及上下两个封严。文献[3]证实了预旋腔内的掺混损失对喷嘴性能有较大的影响,因此本文计算模型包括静止的进气腔、预旋喷嘴以及转动部分的预旋腔和接受孔,为消除接受孔转动壁面对气流做功的影响,本文将接受孔改为环缝。系统模型示意图如图3所示。

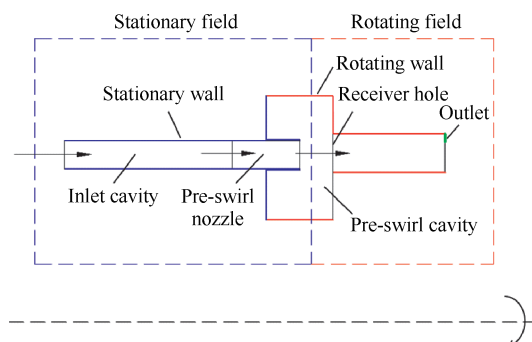


Fig. 3 System model

图4(a)为叶片式喷嘴计算模型图。进气腔为30mm,高度与叶高相同;接受孔(环缝)总面积7000mm²,半径位置170mm。考虑到流动周期性,仅对一个预旋喷嘴进行数值模拟计算,计算模型取1/52的盘腔如图中黄色部分所示。图4(b)为叶型孔式喷嘴模型图,图中画出的部分为流体域,相邻流道之间即为固体域,可与图1(b)相对照。vsh-52喷嘴无量纲叶高为0.5,其他叶片造型参数与叶片式喷嘴相同。进气腔宽度与叶高相同,进气腔长度、预旋腔尺寸、接受孔总面积和半径位置均与叶片式喷嘴模型相同。

两种喷嘴模型划分网格时采用分区域网格划分方法,考虑到喷嘴中流体流动速度变化较大,所以将叶片附近区域的网格加密,并将模型中靠近壁面的区域也进行网格加密,整个模型采用六面体网格进行划分。在网格数分别为50万,70万,100万左右进

行了网格无关性验证,流量系数偏差均在0.5%以内,综合考虑将网格总数控制在70万左右。

2.3 计算方法和边界条件

采用Fluent6.3商业软件进行三维数值模拟,控制方程为三维稳态湍流流动与传热方程,方程离散采用二阶迎风格式,流动方程求解采用SIMPLE算法。空气密度按理想气体计算,比热和粘性等物性参数考虑随温度变化。湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,近壁面采用标准壁面函数^[12]。

模型边界条件:(1)进气腔进口给定总温和总压。(2)调整出口压力来保证接受孔入口静压不变,静压根据进口总压和系统压比计算而得。给定接受孔静压意味着整个计算模型将预旋腔掺混影响考虑在内。(3)转动壁面给定转速。(4)两喷嘴之间为周期边界条件,其余为绝热无滑移壁面。(5)转动问题的求解采用定常的MRF(Multiple Reference Frame)法,其中动静交界面处理采用固定转子相位法(Frozen Rotor),详细方法可参考文献[12]。

3 参数定义与理论分析

3.1 系统压比

系统进出口压比 π 定义为

$$\pi = p_0^*/p_2 \quad (1)$$

式中 p_0^* 为进气腔进口总压, p_2 为接受孔入口截面平均静压。

3.2 落后角

$$\Delta\phi = \phi - \theta \quad (2)$$

式中 ϕ 为喷嘴出口气流的实际出气角度, θ 为喷嘴预旋角度。

3.3 流量系数

喷嘴流量系数 $C_{D,\text{nozzle}}$ 是指喷嘴出口处实际质量流量与理想质量流量之比。定义为

$$C_{D,\text{nozzle}} = \dot{m}/\dot{m}_{\text{id,nozzle}} \quad (3)$$

式中 $\dot{m}$ 为实际质量流量, $\dot{m}_{\text{id,nozzle}}$ 为喷嘴出口理想质量流量,计算方法参见文献[13,14],其中计算理想流量时,总压取为进气腔进口总压,静压为喷嘴出口静压,面积为喷嘴喉部面积。喷嘴流量系数反映的是预旋喷嘴的流阻特性。

有效流量系数 $C_{D,\text{eff}}$ 是指气流经过预旋腔掺混后在接受孔入口处实际质量流量与理想质量流量之比。定义为

$$C_{D,\text{eff}} = \dot{m}/\dot{m}_{\text{id,receiver}} \quad (4)$$

式中 $\dot{m}$ 为实际质量流量, $\dot{m}_{\text{id,receiver}}$ 为接受孔入口

理想质量流量,其中计算理想流量时,总压取为进气腔进口总压,静压为接受孔入口静压,面积为接受孔入口面积。有效流量系数是将预旋腔内掺混损失考虑在内,是一个反映喷嘴流阻以及预旋腔流阻的综合指标。

3.4 喷嘴预旋效率

喷嘴预旋效率是指喷嘴出口处实际周向速度与理想周向速度之比。定义为

$$\eta_{\text{nozzle}} = V_{\phi,\text{nozzle}}/V_{\phi,\text{id,nozzle}} \quad (5)$$

式中 $V_{\phi,\text{nozzle}}$ 为喷嘴出口处气流实际周向速度; $V_{\phi,\text{id,nozzle}}$ 为喷嘴出口理想周向速度。在流动无损失和完全预旋,即流量系数为1,出气角度为 0° 的理想条件下, $V_{\phi,\text{id,nozzle}}$ 与 $V_{\text{id,nozzle}}$ 相等,其中 $V_{\text{id,nozzle}}$ 是根据式(3)中的理想流量计算而得。

有效预旋效率是指气流经过预旋腔掺混后在接受孔入口处的实际周向速度与理想周向速度之比。

$$\eta_{\text{eff}} = V_{\phi,\text{receiver}}/V_{\phi,\text{id,receiver}} \quad (6)$$

式中 $V_{\phi,\text{receiver}}$ 为气流在接受孔入口处实际周向速度; $V_{\phi,\text{id,receiver}}$ 为接受孔入口理想周向速度。在流动无损失和完全预旋,即流量系数为1,出气角度为 0° 的理想条件下, $V_{\phi,\text{id,receiver}}$ 与 $V_{\text{id,receiver}}$ 相等。其中 $V_{\text{id,receiver}}$ 是根据式(4)中的理想流量计算而得。有效预旋效率反映的是经过预旋腔掺混后的周向速度相对大小,是一个与系统温降关系更加紧密的无量纲参数。

4 对比分析与讨论

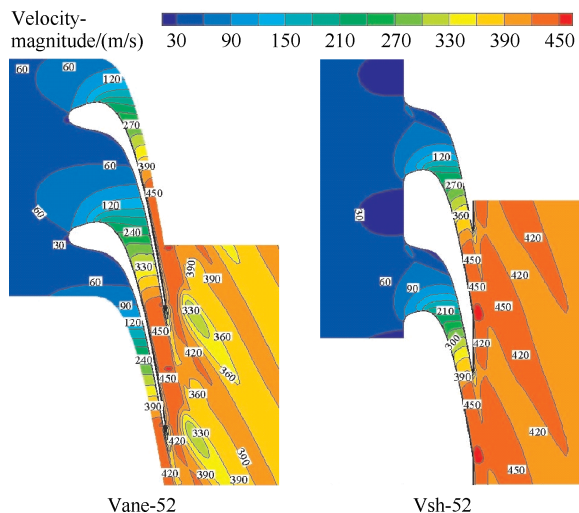
4.1 流场对比分析

图5(a)给出了压比为1.5时两种预旋喷嘴的截面速度云图。从图中可以看出vane-52喷嘴在流道内存在速度分离,且在尾缘处尾迹掺混现象明显。而vsh-52喷嘴在流道内速度均匀性好,没有明显的速度分离,加速和偏转性能较好,且气流在预旋腔内部仍能保持较大的周向速度。此外还能看到,vsh-52喷嘴在增加的固体壁面处气流速度较低,有一定的尾迹损失。

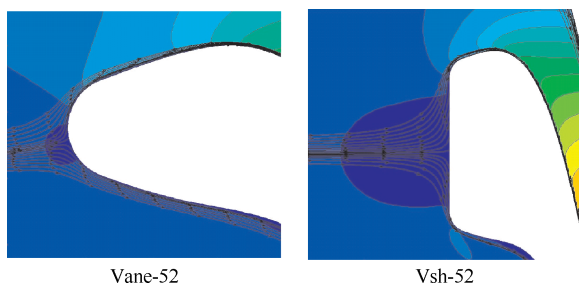
图5(b)给出了两种喷嘴前缘的速度分布云图和流线图。由于叶型孔式喷嘴的前缘较叶片式喷嘴前缘来说,固体壁面变大,轴向进气时,气流撞击损失略有增大;但是从图中可以看出,进入喷嘴前,气流速度较低,因而损失也较小。

图5(c)给出了两种喷嘴尾缘的速度分布云图和流线图。从图中可以看出,叶片式喷嘴的叶型上、下表面附面层汇合形成了涡流,同时尾迹区与主流区

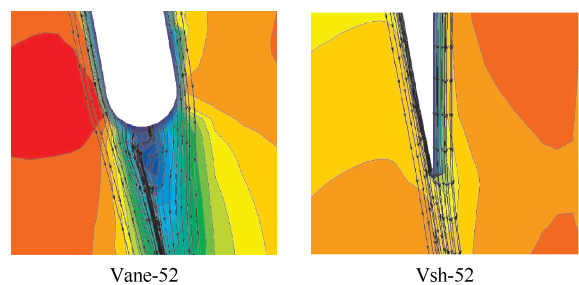
相互掺混造成了较大的尾迹损失。而叶型孔式喷嘴的尾部为一固体壁面,速度较高的吸力面气流经过壁面后速度降低,在与压力面气流掺混时,速度差相对较小,没有明显的涡流区,掺混损失也随之减小。



(a) Velocity contours on the axial section of different nozzle



(b) Streamline of leading edge



(c) Streamline of the trailing edge

Fig. 5 Velocity contours on the axial section and streamline of leading edge and trailing edge ($\pi = 1.5$)

图6为0.75倍轴向弦长截面($x=0.75L$)和喷嘴出口截面(nozzle-out)的总压等值线图。通过总压等值线图,可以清楚地看出两个喷嘴在靠近出口处端壁损失和尾迹损失的相对大小。vane-52喷嘴在叶高方向的壁面附近总压梯度较大,可知无量纲叶高过小,端壁损失明显增大。同时,vane-52在吸力面、压力面附近总压梯度显著大于vsh-52,这可以说明vane-52喷嘴的尾迹损失较大。

4.2 出气速度对比

图7定量地给出了不同压比下两个喷嘴出口截面的平均出气速度和周向出气速度对比。从图7(a)中可以看出,随压比的增大,两个喷嘴的出气速度逐渐增大,vsh-52喷嘴的出气速度始终高于vane-52喷嘴,且压比越大,二者之差越大。当压比为1.5时,vsh-52喷嘴的出气速度为426.24m/s,比vane-52的410.81m/s高3.76%。从图7(b)中可以看出,喷嘴出口周向出气速度与出气全速度变化规律一致。压比1.5时,vsh-52喷嘴周向出气速度为419.21m/s,比vane-52的403.14m/s高4%。可见,vsh-52喷嘴的加速性能更好。

4.3 落后角对比

图8定量地给出了两种喷嘴的落后角随压比的变化。从图中可以看出,两种喷嘴的落后角均随压比的增大略微增大。vsh-52喷嘴的落后角要明显小于vane-52的落后角,压比1.5时vsh-52落后角仅有 0.354° ,比vane-52的 0.864° 低59%。因此可以说vsh-52喷嘴使气流偏转的性能更好。

4.4 流量系数对比

图9给出了两种喷嘴的喷嘴流量系数($-nozzle$)和有效流量系数($-eff$)随压比的变化。从图中可以看到,随压比的增大,喷嘴流量系数总体上逐渐增大,但增幅较小。压比一定时vsh-52喷嘴的流量系数远高于vane-52的喷嘴流量系数,这是因为vsh-52喷嘴的无量纲叶高达到相对最佳值0.5,与vane-52

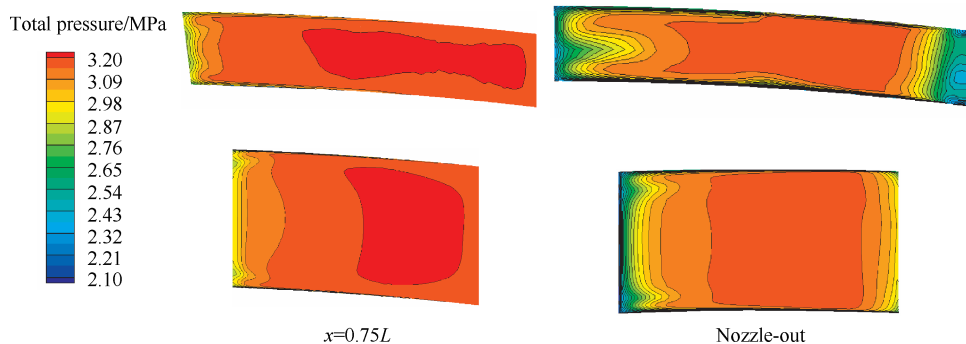


Fig. 6 Total pressure of different sections ($\pi = 1.5$)

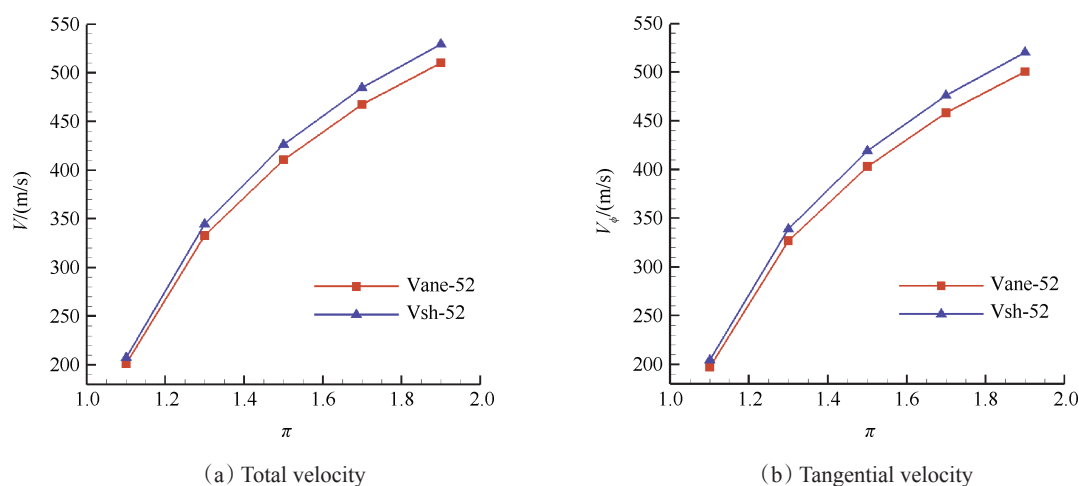


Fig. 7 Outlet velocity depended upon pressure ratio

相比叶栅端壁二次涡流损失比重小,因而流量系数高。压比 1.5 时, vsh-52 的喷嘴流量系数可以达到 0.943, 比 vane-52 喷嘴的 0.864 高 9.14%。

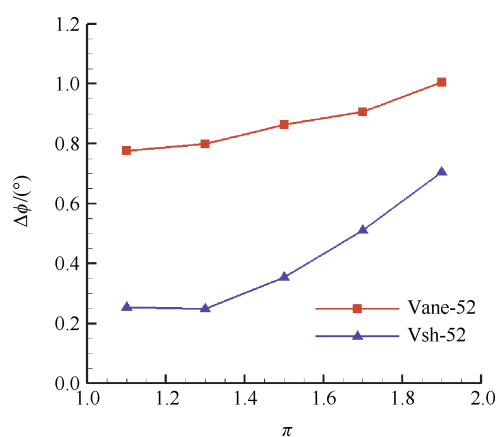


Fig. 8 Deviation angle depended upon pressure ratio

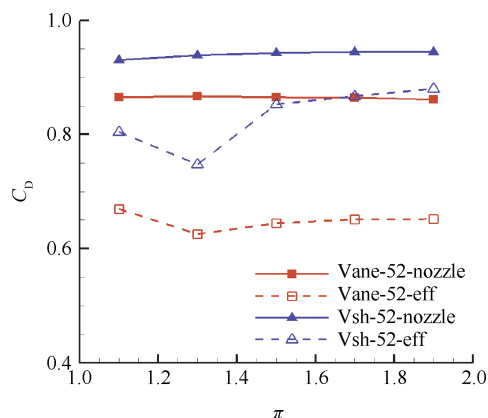


Fig. 9 Discharge coefficient depended upon pressure ratio

从图中还可以看出同压比下, 考虑喷嘴下游预旋腔掺混的有效流量系数显著低于喷嘴流量系数。这是因为气流从喷嘴出口流经预旋腔到接受孔入口这一过程会产生较大的突扩、突缩和气流掺混等损

失, 从而导致在接受孔入口流量系数降低。在预旋腔内虽然二者都会产生较大损失, 但叶型孔式预旋喷嘴的有效流量系数仍高于叶片式喷嘴。压比 1.5 时, vsh-52 喷嘴的有效流量系数可以达到 0.853, 比 vane-52 的 0.645 高 32.2%。这是由于叶片式喷嘴的尾迹损失大, 且叶高较小, 喷嘴出口气流速度较低, 导致突扩损失更大。从有效流量系数可以看出, 叶型孔式喷嘴在流道前后的固体壁面处虽然带来一定损失, 但综合来看, 性能是优于叶片式喷嘴的。

此外, 可以看到除压比 1.1 情况外, 有效流量系数随压比的增大逐渐增大后基本不变。

4.5 预旋效率对比

图 10 为两种喷嘴的喷嘴预旋效率 (η_{nozzle}) 和有效预旋效率 (η_{eff}) 随压比的变化。从图中可以看出, 随压比的增大, 两种喷嘴的喷嘴预旋效率均逐渐增大。vsh-52 的喷嘴预旋效率远高于 vane-52。压比 1.5 时, vsh-52 的喷嘴预旋效率可以达到 0.94, 比 vane-52 喷嘴的 0.9 高 4.44%。除压比 1.1 外, 其余情况下, 两喷嘴的有效预旋效率均低于喷嘴预旋效率, 也就是说气流从喷嘴出口经过预旋腔至接受孔入口, 周向速度都是在降低的, 这是因为高压比情况, 气流在喷嘴出口的旋转比均大于 1, 此时喷嘴下游的静止壁面以及转动壁面均对气流其负作用。在预旋腔内, 虽然都有损失, 但 vsh-52 的有效预旋效率显著高于 vane-52。压比 1.5 时, vsh-52 有效预旋效率为 0.898, 比 vane-52 的 0.848 高 5.9%。可见, 叶型孔式预旋喷嘴可以使气流产生较大的周向速度, 并在接受孔入口处仍能保持较高的周向速度分量。

此外可以看到, 两种喷嘴的有效预旋效率均随压比的增大先降低后略微增大。压比 1.1 时, 两种喷嘴的有效预旋效率显著大于高压比情况, 这是因为

压比 1.1 时,气流在喷嘴出口的旋转比约为 0.7,在预旋腔内,旋转壁面对气流做功,导致在接受孔入口处周向速度显著增大,因而导致有效预旋效率高。

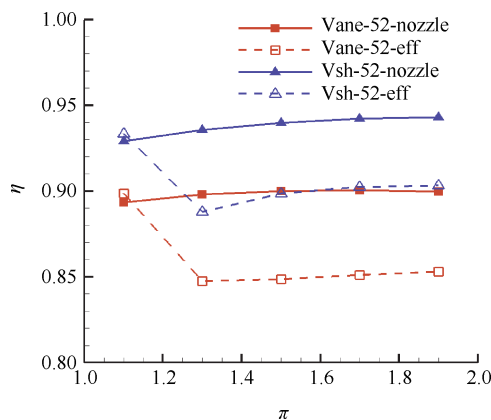


Fig. 10 Preswirl effectiveness depended upon pressure ratio

5 结 论

通过本文研究,得出以下结论:

(1)提出了一种新型预旋喷嘴——叶型孔式预旋喷嘴。它由于可以灵活地设计栅距和叶高,使预旋喷嘴的无量纲叶高到达最佳值,使得其流量系数和预旋效率都显著高于叶片式喷嘴。

(2)压比 1.5 时, vsh-52 比 vane-52 的落后角低 59%,喷嘴出口全速度高 3.76%,喷嘴出口周向速度高 4%,流量系数高 9.14%,预旋效率高 4.44%; vsh-52 喷嘴的有效流量系数比 vane-52 高 32.2%,有效预旋效率比 vane-52 高 5.9%。

(3)本文提出的有效流量系数、有效预旋效率,不仅考虑了喷嘴性能,还将预旋腔掺混损失包含在内,是一个与系统温降关系更加紧密的无量纲参数。

致谢:中航商用航空发动机有限责任公司以及中航沈阳发动机设计研究所对本文的资助。

参考文献:

- [1] Meierhofer B, Franklin C J. An Investigation of a Pre-Swirl Cooling Airflow to a Turbine Disc by Measuring the Air Temperature in the Rotating Channels [R]. ASME 81-GT-132.
- [2] Dittman M. Discharge Coefficients of a Pre-Swirl System in Secondary Air System [R]. ASME 2001-GT-0122.
- [3] Geis T. Cooling Air Temperature Reduction in a Direct Transfer Pre-Swirl System [R]. ASME GT2003-38231.
- [4] Bricaud C, Geis T, Dullenkopf K, et al. Measurement and Analysis of Aerodynamic and Thermodynamic Losses in Pre-Swirl System Arrangement [R]. ASME 2007-GT-27191.
- [5] Lewis P, Wilson M, Lock G J, et al. Effect of Radial

Location of Nozzle on Performance of Pre-Swirl Systems [R]. ASME 2008-GT-50295.

- [6] Yan Y, Gord M F, Lock G D, et al. Fluid Dynamics of a Pre-Swirl Rotor-Stator System [R]. ASME GT-2002-30415.
- [7] Javiya U. A Comparative Study of Cascade Vanes and Drilled Nozzle Design for Pre-Swirl [R]. ASME 2011-GT-46006.
- [8] 冶 萍, 张靖周. 有预旋进气转静盘腔中的流动和换热特性数值研究 [J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 370-374.
- [9] 丁水汀, 陶 智, 徐国强, 等. 带进气预旋的旋转空腔平均换热特性研究 [J]. 航空动力学报, 1998, 13(3): 277-280.
- [10] 徐国强, 陶 智, 丁水汀, 等. 中心进气旋转盘流动与换热的数值研究 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 169-173.
- [11] 罗 翔, 徐国强, 陶 智, 等. 进气角度对旋转盘冷却效果的影响 [J]. 推进技术, 2007, 28(3): 240-243. (LUO Xiang, XU Guo-qiang, TAO Zhi, et al. Cooling Effectiveness in a Rotor-Stator System with Different Pre-Swirl Angles [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(3): 240-243.)
- [12] 朱晓华, 刘高文, 刘松龄, 等. 带盖板的预旋系统降温 and 压力损失数值研究 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2498-2506.
- [13] 刘高文, 李碧云, 蒋兆午, 等. 预旋角度对预旋孔流动特性的影响 [J]. 推进技术, 2012, 33(5): 740-746. (LIU Gao-wen, LI Bi-yun, JIANG Zhao-wu, et al. Effects of Pre-Swirl Angle on Flow Characteristics of Pre-Swirl Nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(5): 740-746.)
- [14] 刘高文, 张 林, 李碧云, 等. 扩口孔型预旋喷嘴流动与温降特性 [J]. 推进技术, 2013, 34(3): 390-396. (LIU Gao-wen, Zhang Lin, LI Bi-yun, et al. Investigation on Flow Characteristics and Temperature Drop of an Aerodynamic-Hole Typed Pre-Swirl Nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013, 34(3): 390-396.)
- [15] 刘育心, 刘高文, 徐 权, 等. 无量纲叶高对叶型喷嘴流动特性的影响 [J]. 推进技术, 2015, 36(3). (LIU Yu-xin, LIU Gao-wen, XU Quan, et al. Influences of Non-Dimensional Blade Height on the Flow Characteristics of Cascade Vane Preswirl Nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(3).)
- [16] 康 松, 杨建明, 胥建群, 等. 汽轮机原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [17] 隋秀明, 赵庆军, 赵晓路, 等. 低进气度部分进气涡轮气动设计与内部流动研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(3): 419-422.
- [18] 阳 虹, 杨建道, 李 军, 等. 汽轮机调节级气动性能分析和结构优化设计 [J]. 热力透平, 2011, 40(1): 5-10.

(编辑: 史亚红)