

水汽比对涡轮预旋供气系统温降影响的数值分析

王家友¹, 邓明春¹, 周建军¹, 刘高文²

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015; 2. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为了揭示喷水冷却所引起湿空气环境对涡轮供气系统温度的影响,基于欧拉-拉格朗日多相流颗粒追踪方法,在预旋供气系统进口总压150 kPa和总温450 K条件下,开展湿空气对预旋供气系统温降的影响程度评估,分析预旋供气系统内旋转比和预旋喷嘴流量系数的变化规律,揭示预旋供气系统温降的影响规律。结果表明:在水汽比由0增加到0.3时,水汽比变化对预旋喷嘴内流动和温度变化影响显著,预旋喷嘴的气流旋转比由1.36增加到1.43,而其压比由1.523降低到1.482,流量系数由0.97降低到0.90,从而使预旋喷嘴温降由25.79 K减小到22.28 K;预旋供气系统温降由12.07 K降低到11.03 K。含湿条件会增加系统内流动阻力,限制了预旋供气系统降温能力,在涡轮叶片供气温度需求不变时,含湿条件将需要更高的供气压力。

关键词:燃气涡轮发动机;预旋供气系统;水汽比;旋转比;温降

中图分类号:V235.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.01.017

[引用本文格式]王家友,邓明春,周建军,等.水汽比对涡轮预旋供气系统温降影响的数值分析[J].热能动力工程,2024,39(1):158-164. WANG Jia-you, DENG Ming-chun, ZHOU Jian-jun, et al. Numerical analysis of the effect of water to steam ratio on temperature drop of a turbine Pre-swirl air supply system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 158-164.

Numerical Analysis of the Effect of Water to Steam Ratio on Temperature Drop of a Turbine Pre-swirl Air Supply System

WANG Jia-you¹, DENG Ming-chun¹, ZHOU Jian-jun¹, LIU Gao-wen²

(1. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang, China, Post Code: 110015;
2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072)

Abstract: To reveal the influence of the wet air conditions caused by water injection pre-cooling on the temperature of the turbine air supply system, this paper focused on the influence evaluation of wet air on the temperature drop of pre-swirl air supply system under the conditions of total pressure of 150 kPa and total temperature of 450 K at the inlet of the pre-swirl air supply system based on Euler-Lagrangian multi-phase flow particle tracking method. The variation laws of both swirl ratio of the system and flow coefficient of pre-swirl nozzle were analyzed in detail. The influence law of temperature drop of the pre-swirl air supply system was revealed. Results show that the water to steam ratio has a significant effect on the flow and temperature in pre-swirl nozzle as the water to steam ratio increases from 0 to 0.3. The airflow swirl ratio of pre-swirl nozzle increases from 1.36 to 1.43, while its pressure ratio decreases from 1.523 to 1.482, and its flow coefficient drops from 0.97 to 0.90, thus reducing the temperature drop of pre-swirl nozzle from 25.79 K to 22.28 K; in particular, the temperature drop of pre-swirl air supply system is reduced from 12.07 K to 11.03 K. It can be concluded that the flow resistance in the system will increase under the system inlet conditions with humidity so as to limit the cooling ability of the pre-swirl air supply

收稿日期:2022-11-27; 修订日期:2022-12-08

基金项目:航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目(P2022-A-II-007-001)

Fund-supported Project: Science Center for Gas Turbine Project(P2022-A-II-007-001)

作者简介:王家友(1987-),男,中国航发沈阳发动机研究所工程师。

system. Therefore, the air supply pressure of the system will be required higher at the humidity conditions when the air supply temperature of the turbine blade is constant.

Key words: gas turbine engine, pre-swirl air supply system, water to steam ratio, swirl ratio, temperature drop

引言

进气喷水预冷可以明显改善燃气涡轮发动机高推力的工作环境。射流预冷涡轮发动机在大飞行马赫数条件下要在进气道加装喷水预冷装置,向进气道中喷入雾化的液态水,通过雾化蒸发吸热,降低发动机进口总温^[1-2]。而过量的进气喷水预冷,使进入压气机内的流动工质造成由干空气、水蒸气和液滴组成的湿空气^[3-4]。在航空发动机空气系统对涡轮叶片进行冷却的过程中,冷气源一般从压气机级间的干空气引气^[5],冷气在进入涡轮叶片之前要经过一个供气系统。该冷气供气系统用来保证适当压力、流量的冷气进入涡轮叶片,称为预旋供气系统^[6]。可见,预旋供气系统作为涡轮叶片冷却的关键^[7-8],由进气喷水预冷所产生的湿空气不可避免地随冷气引气源进入预旋供气系统。

Yan 等人^[9]对直接式预旋系统的流动特性进行了实验和数值研究,得到了转速、流量、旋转比、喷嘴数量及总面积等对流场和压力损失的影响。Bricaud 等人^[10]深入研究了预旋系统的气体动力损失和热力学损失,从流量系数、温度、压力及速度等方面对大量的预旋系统模型进行了研究,就喷嘴和接受孔的面积及外形、预旋腔形状及大小等预旋系统几何结构变化对流动和换热的影响进行了研究。林阿强等人^[11]针对高马赫数下航空发动机高温进气问题,建立了高空环境下预冷段-压气机内气雾蒸发冷却的数学模型,基于欧拉-拉格朗日多相流数值方法分析了不同喷雾条件和高空环境时压气机特性变化,开展了射流冷却对航空发动机压气机的特性分析。涂洪妍等人^[12]通过数值模拟研究了水汽比对射流预冷喷射特性的影响,研究发现,随着水汽比的增加,出口截面的液态水蒸发量上升,蒸发率和截面平均总温下降,完全蒸发距离增加。

综上所述,开展进气喷水过饱和冷却所引起湿空气流动工质对预旋供气系统影响的研究具有一定的研究价值,但当前少有公开报告。因此,本文重点考虑射流预冷发动机进气工质组分的变化对涡轮叶

片预旋供气系统温降的影响程度。研究结果对射流预冷涡轮发动机空气系统设计和研究提供一定的工程参考。

1 计算模型与计算方法

1.1 计算模型及网格

以某型燃气涡轮发动机预旋供气系统结构为研究对象开展湿空气对预旋供气系统温降性能影响的数值研究。通过简化,预旋供气系统的计算域选取整环系统结构的1/60,如图1(a)所示。计算域进、出口段适当延长,以确保进气和出气流场的充分发展。计算模型包括进气腔、预旋喷嘴、预旋腔、接受孔、盖板腔和供气孔。预旋喷嘴、接受孔和供气孔的数量比为1:1:1。

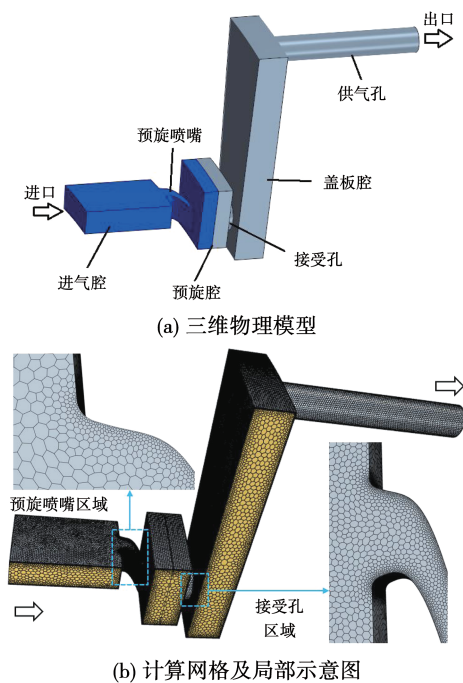


图1 涡轮预旋供气系统计算模型

Fig. 1 Computational model of turbine pre-swirl air supply system

采用商业软件 STAR-CCM+ 对计算模型进行网格划分。计算区域均采用多面体网格,对型面较为复杂的预旋喷嘴,在速度梯度较大的接受孔等位置进行加密处理,模型腔体两侧设为周期面。为满

足壁面函数对 Y^+ 的要求,经过试算,将第一次边界层厚度设置为 0.01 mm,并通过“全壁面处理”技术减小对 Y^+ 的限制,可依据来流速度自动调用壁面函数。预旋供气系统的计算网格划分结构如图 1(b) 所示。针对计算网格数 530 862、1 024 251、1 510 022、2 038 641 和 2 981 617 的计算模型,进行网格无关性验证,发现网格数量在约 150 万之后预旋供气系统温降的数值结果偏差较小,并且约 200 万和约 300 万计算网格时系统温降结果偏差不大于 1.2%。因此,计算模型网格数量确定为 2 038 641 单元数。

1.2 计算方法和边界条件

采用动参考系模型(Moving Reference Frame)处理预旋供气系统涉及到的转动和静止区域相互作用的问题。根据文献[13-14]的研究成果,湍流模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型,近壁面使用标准壁面函数进行处理。控制方程采用三维稳态湍流流动和传热方程,方程离散采用二阶迎风格式,速度与压力耦合采用 SIMPLE 算法,空气和水蒸气均忽略分子间作用力,认为满足理想气体状态方程。各组分气体密度按理想气体计算,粘性系数使用 Sutherland 公式计算,比热等物性参数考虑随温度变化,混合工质物性参数根据各组分的质量分数进行质量平均。针对湿空气的组分,干空气和水蒸气为连续项、液态雾滴为离散项,采用欧拉-拉格朗日多相流颗粒追踪方法计算连续项和离散项的控制方程。为研究湿空气引气源进入预旋供气系统对温降的影响,定义水汽比 τ 为工质中水蒸气和干空气的质量流量之比,即:

$$\tau = m_v / m_a \quad (1)$$

式中: m_v, m_a —水蒸气和空气的质量流量,kg/s。

预旋供气系统从压气机级间的引气,在进气喷水过饱和状态时,压气机部分级间引气存在湿空气状态。根据某工程研制的 TBCC 发动机,其涡轮基发动机射流预冷状态下,最大水汽比约为 0.12,在工程实际的基础上适当拓宽了研究范围。取水汽比 $\tau=0 \sim 0.3$ 为研究范围,当 $\tau=0$ 时,代表引气的流动工质为干空气。计算模型的边界条件:进气腔进口为压力进口条件,给定总压 150 kPa、总温 450 K;出口为压力出口条件,给定静压;计算域和进出口给定空气和水蒸气的质量比;固体壁面为绝热无滑移壁面,转子壁面和转动域都给定转速 10 000 r/min。

1.3 参数定义

在预旋供气系统内,预旋喷嘴压比越大,其流量

系数越大,使得预旋喷嘴出口气流旋转比也就越大,从而引起越高的系统温降。为评估水汽比对预旋供气系统温降的影响,引入压比、气流旋转比、流量系数和系统温降 4 个特征参数作为评价指标。

预旋供气系统内各部件的压比^[15]定义为各部件的进口总压(p_{in}^* , Pa)与出口静压(p_{out} , Pa)之比:

$$\pi = p_{in}^* / p_{out} \quad (2)$$

气流旋转比(β)是预旋供气系统重要的无量纲参数,定义为:

$$\beta = \frac{V_\varphi}{U} = \frac{V_\varphi}{\omega r} \quad (3)$$

式中: V_φ —气流周向速度, m/s; U —转盘线速度, m/s; r —半径; ω —转盘角速度, rad/s。

流量系数反映了流道的流阻特性,综合反映了研究对象进出口局部损失、流动的沿程损失以及掺混损失情况。流量系数 C_D 定义为研究对象(预旋喷嘴,接受孔,供气孔等)的实际流量 m 与理想流量 m_{id} 之比,即:

$$C_D = m / m_{id} \quad (4)$$

预旋供气系统温降能够直接表征系统温降的物理量^[16]。系统温降 ΔT 定义为预旋供气系统进口绝对总温 $T_{in,abs}^*$ 与出口相对总温 $T_{out,rel}^*$ 之差,即:

$$\Delta T = T_{in,abs}^* - T_{out,rel}^* \quad (5)$$

2 计算结果与讨论

以下重点分析湿空气对预旋供气系统流动和温降的影响规律,明晰水汽比对系统内流动特征的影响,揭示水汽比对系统各特征参数的影响规律。

2.1 水汽比对系统内流动特征的影响

为了解湿空气进入预旋供气系统对流场的影响,图 2~图 3 给出了不同水汽比时沿流向的横截面处速度和压力云图,其中特征截面包含了进气腔、预旋喷嘴、预旋腔、接受孔和盖板腔的流动区域,水汽比 $\tau=0$ 表示工质不含水蒸气,即干空气。由图 2 可知,在预旋喷嘴出口和接受孔进口区域有明显的速度高值区。随着水汽比从 0 增加到 0.3 的过程中,预旋喷嘴出口速度明显增加,一方面,使预旋喷嘴出口气流分离程度加强,易引起预旋腔内气体掺混加剧,进而导致预旋喷嘴的气动损失增加;另一方面,预旋喷嘴出口流速变大导致接受孔进口处气流偏折程度增大,涡结构增强,接受孔进口流动损失增加。

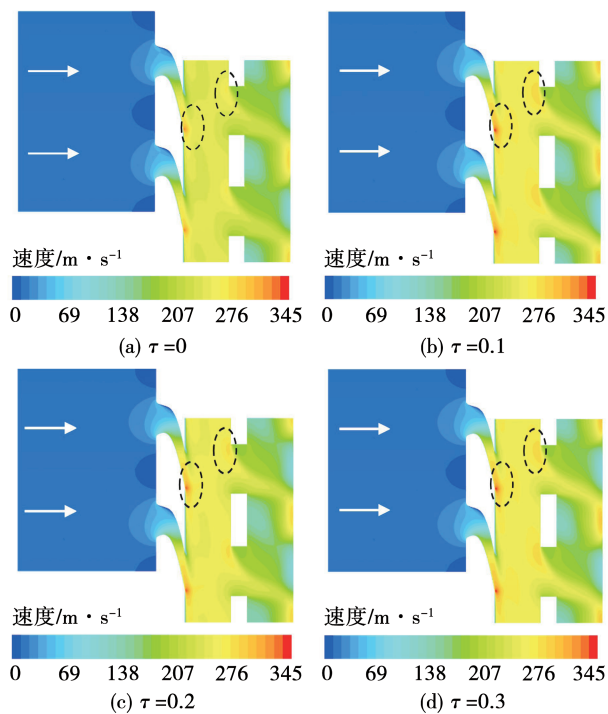


图 2 不同水汽比时预旋供气系统内沿流向特征截面处速度云图

Fig. 2 Velocity contours on characteristic section along the flow direction in pre-swirl air supply system at different water to steam ratios

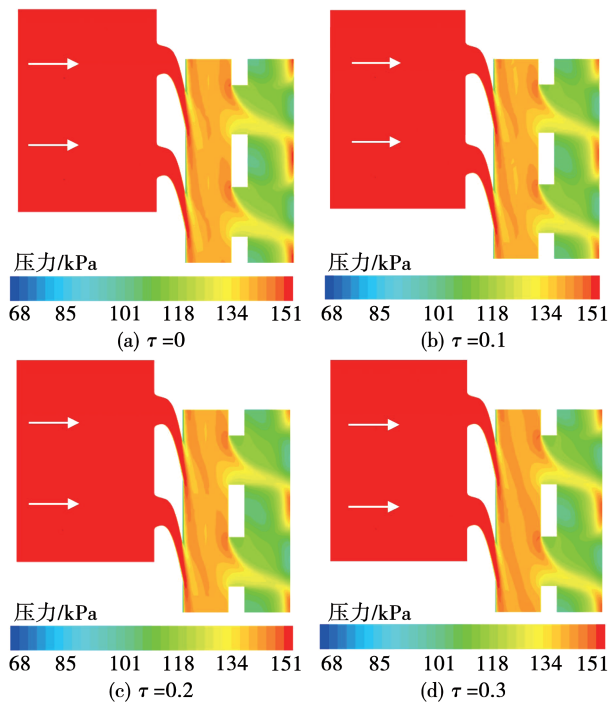


图 3 不同水汽比时预旋供气系统内沿流向特征截面处压力云图

Fig. 3 Pressure contours on characteristic section along the flow direction in pre-swirl air supply system at different water to steam ratios

由图 3 的压力云图进一步可知,随着来流水汽比增加,预旋腔气流压力明显增大。这是因为液态水滴吸热蒸发,由于空气和水蒸气组成的湿空气总压力提高,更易于湿空气的加速膨胀。通过预旋喷嘴加速后的气流经过接受孔,冲击到涡轮盘壁面,由于速度增大,气流撞击到涡轮盘壁面后反弹形成的涡结构增强,显著增加了气流在盖板腔内的掺混损失。

2.2 水汽比对系统压比的影响

为了明确含湿工质蒸发所引起流场压力的变化,图 4 给出了由水汽比引起预旋供气系统内关键部件压比的对比。沿着“预旋喷嘴-接受孔-供气孔”的流向,部件压比呈现先降低后增加的趋势。随着水汽比由 $\tau=0$ 增加到 $\tau=0.3$,预旋喷嘴压比由 $\pi=1.523$ 降低到 $\pi=1.482$,降幅 2.72%;接受孔压比由 $\pi=1.050$ 增大到 $\pi=1.054$,增幅 0.44%;供气孔压比由 $\pi=1.228$ 增大到 $\pi=1.234$,增幅 0.49%。

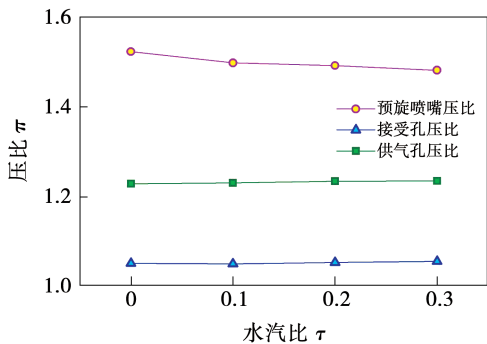


图 4 不同水汽比时各部件压比的变化

Fig. 4 Variation of pressure ratio of each component at different water to steam ratios

2.3 水汽比对系统内气流旋转比的影响

预旋供气系统的温降在很大程度上取决于预旋喷嘴出口的旋转比^[17],盘腔内压力的变化也与喷嘴出口旋转比密切相关^[18]。预旋供气系统各特征位置气流旋转比分布情况如图 5 所示。不同水汽比条件下,气流从预旋供气系统入口经预旋喷嘴、接受孔与供气孔至预旋供气系统出口,沿程的旋转比变化规律相同。气流进入预旋供气系统时只有轴向速度,旋转比为零;经过预旋喷嘴加速和变向后,产生明显的周向速度,旋转比升高到 1.4 左右,此时气流

的周向速度大于涡轮盘的周向速度,属于过预旋。过预旋状态下,气流对涡轮盘做功,因此经过接受孔后,气流周向速度会降低,旋转比降低。当气流经过盖板腔进入供气孔后,气流会被强制与供气孔同步旋转,即旋转比被强制为 1。

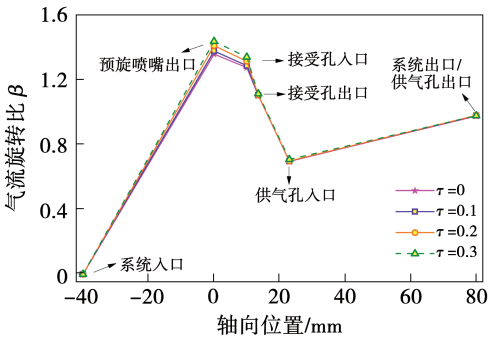


图 5 不同水汽比时沿轴向气流旋转比的变化
Fig.5 Variation of airflow swirl ratio along the axial direction at different water to steam ratios

由图 5 可知,水汽比对旋转比影响最大的位置出现在预旋喷嘴出口处。当水汽比为零时,预旋喷嘴出口旋转比为 1.36,随着水汽比的增加,预旋喷嘴出口的旋转比逐渐增大,当水汽比为 0.3 时,预旋喷嘴出口旋转比增加到 1.43,增加了 5.82%。在过预旋情况下,旋转比的增加对预旋温降有着负面的影响。因此,对预旋喷嘴而言,水汽比的增加会削弱其温降效果。由于接受孔的旋转作用,使不同水汽比条件下的旋转比在接受孔出口趋于一致。在水汽比 $\tau=0.3$ 时接受孔出口处旋转比 β 相对于 $\tau=0.1$ 时大 0.92%。

2.4 水汽比对系统内流量系数的影响

预旋喷嘴在不同水汽比条件下的流量系数变化情况如图 6 所示。随着水汽比的增加,预旋喷嘴的流量系数逐渐降低。水汽比 $\tau=0,0.1,0.2$ 和 0.3 条件下对应的预旋喷嘴的流量系数 C_D 依次是 0.97, 0.96, 0.93 和 0.90,呈下降趋势。在水汽比由 $\tau=0$ 增加到 $\tau=0.3$ 时,预旋喷嘴的流量系数降低 7.12%。可见,在射流预冷所引起含湿的条件下,水汽比的增加会显著的增加发动机预旋喷嘴的流动阻力,降低气流的流通能力,进而削弱了预旋喷嘴的降温能力。由于预旋喷嘴流阻增加,需要提高到涡轮冷却气供气压力以保证冷气供气量。

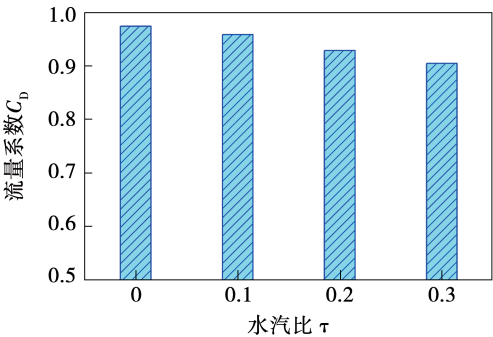


图 6 预旋喷嘴流量系数随水汽比的变化
Fig.6 Variation of flow coefficient of pre-swirl nozzle with water to steam ratio

2.5 水汽比对系统温降的影响

预旋供气系统典型位置温度分布情况如图 7 所示。不同水汽比条件下,气流从预旋供气系统入口经预旋喷嘴、接受孔和供气孔至预旋供气系统出口,沿程的温度变化规律相同。气流经过预旋喷嘴后相对总温迅速降低,经过接受孔后相对总温略有提升。在盖板腔内,由于盘腔的泵效应,气流周向速度显著提升,使其总温升高,进入接受孔后,气流以刚体涡形式存在,旋转比保持为 1,故相对总温不再升高。可以看出,预旋喷嘴是整个预旋供气系统唯一产生温降的位置,预旋喷嘴出口也是整个预旋供气系统相对总温最低点。

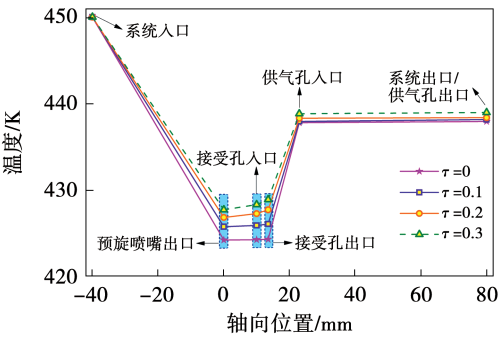


图 7 不同水汽比时沿轴向气流温度的变化
Fig.7 Variation of airflow temperature along the axial direction at different water to steam ratios

由图 7 可知,水汽比对温度的影响最明显的位置出现在预旋喷嘴出口处。当水汽比 $\tau=0$ 时,预旋喷嘴出口温降为 25.79 K(即 $450 - 424.21 = 25.79$ K)。随着水汽比的增加,预旋喷嘴出口的温降逐渐减小,在 $\tau=0.1 \sim 0.3$ 范围内预旋喷嘴温降范围为 22.28

~24.25 K; 在 $\tau = 0.3$ 时预旋喷嘴温降减小到 22.28 K (即 $450 - 427.72 = 22.28$ K), 相对于 $\tau = 0$ 时减小了 13.61%。

图 8 给出了不同水汽比时预旋供气系统温降变化。在水汽比 τ 为 0, 0.1, 0.2 和 0.3 时, 系统温降 ΔT 呈现减小趋势, ΔT 分别为 12.07, 11.85, 11.63 和 11.03 K。结合图 7 可知, 当气流依次经过接受孔和盖板腔后, 温降的差异逐渐缩小。在水汽比由 $\tau = 0$ 增加到 $\tau = 0.1$ 和 $\tau = 0.3$ 时, 系统温降分别降低了 1.82% 和 8.57%。可见, 由含湿条件引起系统温降的效果并不显著, 而在预旋喷嘴温降的效果较为显著 (图 7 可见)。这种现象的主要原因在于, 由水雾蒸发引起湿空气的总压力提高, 增加了预旋供气系统内流动阻力, 从而在一定程度上限制了在含湿条件下由水雾蒸发而降低系统降温的能力。可见, 在供气温度不变的情况下需要提供更高的供气压力。因此, 如果保证涡轮气冷叶片平均冷却效果不变, 需要更多的冷气流量, 在供气结构不变的情况下, 通常是提高冷气的供气压力来满足冷气的流量需求。

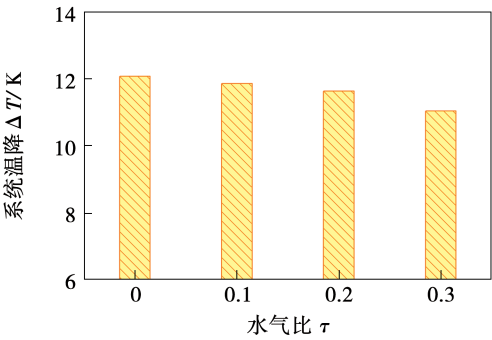


图 8 不同水汽比时预旋供气系统温降变化
Fig.8 Variation of temperature drop of pre-swirl air supply system at different water to steam ratios

3 结 论

(1) 水汽比对旋转比影响最大的位置出现在预旋喷嘴出口处。当水汽比为 0 时, 预旋喷嘴出口旋转比为 1.36。随着水汽比的增加, 预旋喷嘴出口的旋转比逐渐增大。当水汽比为 0.3 时, 预旋喷嘴出口旋转比增加到 1.43, 增加了 5.82%。而预旋喷嘴的流量系数逐渐降低, 水汽比由 0 增加到 0.3 时预旋喷嘴的流量系数降低 7.12%。

(2) 水汽比对温度的影响最明显的位置出现在预旋喷嘴出口处。当水汽比为 0 时, 预旋喷嘴出口温降为 25.79 K。随着水汽比的增加, 预旋喷嘴出口的温降逐渐减小。当水汽比为 0.3 时, 预旋喷嘴出口温降减小到 22.28 K, 减小了 13.61%。当气流依次经过接受孔和盖板腔后, 温降的差异逐渐缩小, 在预旋供气系统出口处, 水汽比 0.3 时的温降比水汽比 0.1 时小 8.57%。

(3) 针对射流预冷所引起含湿引气环境, 在一定程度上会增加预旋供气系统流动阻力, 降低其降温能力, 涡轮冷却气在供气温度不变的情况下需要更高的供气压力。

参考文献:

[1] 周志涛,樊 澍,张 海,等.射流预冷对高空高马赫数下压气机性能影响的数值研究[J].热能动力工程,2021,36(9):95-100.
ZHOU Zhi-tao,FAN Shu,ZHANG Hai,et al. Numerical study on the influence of jet precooling on compressor performance under high altitude and high Mach [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2021,36(9):95-100.

[2] 胡 峰,张 海,王慧杰.有机混合工质对航空发动机射流预冷效果的数值研究[J].热能动力工程,2022,37(5):31-37.
HU Feng,ZHANG Hai,WANG Hui-jie. Numerical study on the effect of organic mixed working medium on mass injection and pre-compressor cooling of aero-engine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(5):31-37.

[3] 林阿强,刘高文,吴 锋,等.高马赫数涡轮发动机射流预冷特性研究[J].推进技术,2021,42(10):2218-2228.
LIN A-qiang,LIU Gao-wen,WU Feng,et al. Mass injection pre-compressor cooling characteristics in high Mach number turbine engine [J]. Journal of Propulsion Technology,2021,42(10):2218-2228.

[4] 林阿强,郑 群,吴 锋,等.航空涡轮发动机射流预冷技术研究[J].推进技术,2020,41(4):721-728.
LIN A-qiang,ZHENG Qun,WU Feng,et al. Investigation on mass injection pre-cooling technology of aero-turbine engine [J]. Journal of Propulsion Technology,2020,41(4):721-728.

[5] 林阿强,赵义祯,王俊淞,等.燃气涡轮发动机预旋系统温降和功耗的作用机制与理论分析[J].中国电机工程学报,2022,42(11):4090-4102.
LIN A-qiang,ZHAO Yi-zhen,WANG Jun-song,et al. Mechanism and theoretical analysis of temperature drop and power consumption in a pre-swirl system of gas turbine engine [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(11):4090-4102.

[6] 龚文彬,刘高文,王 斐,等. 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[J]. 西安交通大学学报,2021,55(7):97-105.

GONG Wen-bin, LIU Gao-wen, WANG Fei, et al. Experimental study on the influence of vane-shaped receiver holes on flow and temperature drop of a high-radius pre-swirl air supply system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2021,55(7):97-105.

[7] 柴军生,屠 杰,马佳乐,等. 涡轮发动机预旋供气系统温降和压比特性[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(8):1139-1146.

CHAI Jun-sheng, TU Jie, MA Jia-le, et al. Temperature drop and pressure ratio characteristics in a pre-swirl air supply system of gas turbine engines[J]. Journal of Harbin Engineering University,2022,43(8):1139-1146.

[8] 李世峰,黄 康,马护生,等. 航空发动机涡轮叶片气膜冷却孔设计与制备技术研究进展[J]. 热能动力工程,2022,37(9):1-11.

LI Shi-feng, HUANG Kang, MA Hu-sheng, et al. Research progress on design and manufacture technologies of film cooling hole for aeroengine turbine blade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(9):1-11.

[9] YAN You-you, GORD M F, LOCK G D, et al. Fluid dynamics of a pre-swirl rotor-stator system [J]. Journal of Turbomachinery,2003,125(4):641-647.

[10] BRICAUD C, GEIS T, DULLENKOPF K, et al. Measurement and analysis of aerodynamic and thermodynamic losses in pre-swirl system arrangements[C]//ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, Canada,2007.

[11] 林阿强,郑 群,张 海,等. 射流冷却对航空发动机压气机的特性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报,2019,40(9):1608-1615.

LIN A-qiang, ZHENG Qun, ZHANG Hai, et al. Analysis of mass injection cooling on aero-engine compressor characteristics [J]. Journal of Harbin Engineering University,2019,40(9):1608-1615.

[12] 涂洪妍,邓远灏,康 松,等. 水汽比对射流预冷喷射特性影响的数值研究[J]. 推进技术,2017,38(6):1302-1309.

TU Hong-yan, DENG Yuan-hao, KANG Song, et al. Numerical simulation for effects for water/air ratio on injection characteristics with water injection pre-compressor cooling [J]. Journal of Propulsion Technology,2017,38(6):1302-1309.

[13] 王锁芳,朱强华,张 羽,等. 预旋进气位置对转静盘腔换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1227-1232.

WANG Suo-fang, ZHU Qiang-hua, ZHANG Yu, et al. Numerical studies of heat transfer in a rotor-stator cavity with different radial positions of pre-swirl inlet[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(8):1227-1232.

[14] 王欣欣,刘高文,龚文彬,等. 封严流对预旋供气系统温降特性影响的数值研究[J]. 推进技术,2020,41(12):2748-2756.

WANG Xin-xin, LIU Gao-wen, GONG Wen-bin, et al. Numerical simulations for effects of seal flow on temperature drop characteristics of pre-swirl air supply system [J]. Journal of Propulsion Technology,2020,41(12):2748-2756.

[15] GONG Wen-bin, LIU Gao-wen, WANG Jia-you, et al. Aerodynamic and thermodynamic analysis of an aero-engine pre-swirl system based on structure design and performance improvement [J]. Aerospace Science and Technology,2022,123:107466.

[16] 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 Yu-xin, LIU Gao-wen, KONG Xiao-zhi, 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.

[17] 刘育心,刘高文,吴 衡,等. 叶型孔式预旋喷嘴流动特性数值研究[J]. 推进技术,2016,37(2):332-338.

LIU Yu-xin, LIU Gao-wen, WU Heng, et al. Numerical investigation on flow characteristics of a vane shaped hole preswirl nozzle [J]. Journal of Propulsion Technology,2016,37(2):332-338.

[18] LIU Gao-wen, LIU Yu-xin, KONG Xiao-zhi, et al. A new design of vane-shaped hole pre-swirl nozzle[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy,2017,231(1):14-24.

(丛 敏 编辑)