

航空发动机压气机内气液非平衡冷却特性研究^{*}

林阿强^{1,2}, 郑群³, 夏全忠⁴, 杨璐³, 刘高文^{1,2}

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129;
2. 西北工业大学 陕西省航空动力系统热科学重点实验室, 陕西 西安 710072;
3. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
4. 中国航发四川燃气涡轮研究院 高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对航空涡轮发动机来流雾化冷却对压气机内气动脉动的影响, 考虑壁面液膜成形和运动, 基于欧拉-拉格朗日多相流方法解析气液两相热质非平衡传输过程, 应用快速傅里叶变换方法将压气机性能参数随旋转周期演变规律的时域脉动敏感性转化为频域功率谱密度的直观分析。结果表明, 压气机内气液非平衡蒸发相变易诱发流场在时间和空间上非定常的气动脉动, 雾化冷却参数与总温比呈线性关系, 而与总压比和效率均呈非线性关系。在雾化量0.5%~5%和雾化平均粒径1~9 μm 内, 较低的雾化量或较小的雾化平均粒径时, 时域总压比的脉动程度更大; 在较低的雾化量或较大雾化平均粒径时, 时域总温比的脉动程度更强; 而在较高的雾化量或较大的雾化平均粒径时, 时域效率脉动程度更高。同时, 雾化冷却量变化对湿压缩过程中流场的时域脉动敏感性程度大于雾化粒径变化。

关键词: 航空涡轮发动机; 压气机; 雾化冷却; 相变蒸发; 非定常脉动; 快速傅里叶变换; 功率谱密度

中图分类号: V233

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2021) 08-1776-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200600

Gas-Liquid Non-Equilibrium Cooling Characteristics of Aero-Engine Compressor

LIN A-qiang^{1, 2}, ZHENG Qun³, XIA Quan-zhong⁴, YANG Lu³, LIU Gao-wen^{1, 2}

- (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. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
4. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory, AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: Given the influence of the atomization cooling of the incoming flow of the aero-turbine engine on the internal airflow of the compressor, the non-equilibrium transmission process of gas-liquid two-phase on heat and mass transfer is analyzed based on the Eulerian-Lagrangian multiphase flow method. And then, the motion factor of the liquid film on the wall is considered. Moreover, the time-domain fluctuation sensitivity of the characteristic parameters of the compressor is transformed into an analysis of the frequency-domain power spectral den-

^{*} 收稿日期: 2020-08-11; 修订日期: 2020-10-27。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (31020210QD701); 国家科技重大专项基金 (2017-I-0009-0010; 2017-II-0006-0019)。

通讯作者: 林阿强, 博士, 副教授, 研究领域为高速涡轮发动机进气射流预冷及高速涡轮盘腔旋转流动传热。

E-mail: linaqiang@nwpu.edu.cn

引用格式: 林阿强, 郑群, 夏全忠, 等. 航空发动机压气机内气液非平衡冷却特性研究[J]. 推进技术, 2021, 42(8):1776-1785. (LIN A-qiang, ZHENG Qun, XIA Quan-zhong, et al. Gas-Liquid Non-Equilibrium Cooling Characteristics of Aero-Engine Compressor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(8):1776-1785.)

sity by the Fast Fourier Transform (FFT) method. Results show that the non-equilibrium evaporation phase transition in the compressor can easily induce the unsteady aerodynamic fluctuation of the flow field in time and space. The atomization cooling parameters have a linear relationship with the total temperature ratio and a nonlinear relationship with both total-pressure ratio and efficiency. In the range of 0.5% ~ 5% water/air ratio and 1~9 μm mist particle mean size, the fluctuation degree of total-pressure ratio in the time domain is higher when water/air ratio is lower or mist particle mean size is smaller. The fluctuation degree of total-temperature ratio in the time domain is stronger when the water/air ratio is lower or atomization particle mean size is larger. The fluctuation degree of efficiency in the time domain is higher when water/air ratio is higher or mist particle mean size is larger. Simultaneously, the sensitivity of the change of water/air ratio to the time domain fluctuation of flow field during the wet compressor is greater than that of mist particle size.

Key words: Aero-turbine engine; Compressor; Atomization cooling; Phase change evaporation; Unsteady fluctuation; Fast Fourier transform; Power spectral density

1 引言

高空高马赫数环境下,基于射流预冷技术可以扩宽涡轮发动机的飞行包线^[1-3]。所谓的射流预冷技术是指在现有涡轮发动机压气机的前端加装雾化冷却装置,利用液态水的汽化潜热来降低高温进气^[4],使发动机不受限于更高的飞行高度和马赫数。自1950年以来,美国开展大量的理论计算、仿真和试验测试,证实了进气射流预冷技术具有成本低、成型快的潜在优势^[5-7]。一方面,在模拟高空高温环境下针对F100发动机进气射流冷却的地面试验论证发现,涡轮增压发动机可运行在 Ma 3以上的环境^[8];另一方面,通过理论计算分析发现,射流预冷涡轮发动机的飞行包线可有效地提升到 Ma 6以上^[9]。

预冷效应可以有效地降低来流温度,并改善气流特性^[10]。实质上,射流雾化冷却过程归结于气液两相传热传质的物理现象^[11],根据来流空气和液滴自身的温度大小,液滴将发生非平衡汽化蒸发或汽化沸腾的现象^[12]。在发动机进气射流预冷时,液滴尺寸、水气比、雾化角度和雾化效果是影响液滴蒸发速率的关键因素^[13]。当雾化量在临界水气比时雾滴完全蒸发,湿空气处于饱和状态;而当雾化量大于临界水气比时,未完全汽化的雾滴将进入发动机内^[14-15]。液滴进入压气机内使湿压缩过程向等温过程靠近^[16],一方面由于液滴温度和对应水蒸汽饱和压力的增加,使液滴蒸发速率显著增大^[17];另一方面,体积压缩速率的增强导致液滴消耗更快^[18]。为此,在压气机内湿压缩过程中,适当的雾化冷却有利于降低压气机排气温度、提高燃油消耗率、减少氮氧化物排放^[19],进而提高发动机的功率输出和循环热效率^[20-21]。然而,针对发动机压气机内雾滴进入空

气环境中,气液非平衡传热传质过程对流场气动特性敏感性的研究较少。

在压气机内湿压缩流动过程研究的基础上^[22-23],本文重点关注进气射流冷却过饱和态时未蒸发完全的液滴进入高速涡轮发动机压气机内气液相变的流场气动敏感性影响。基于欧拉-拉格朗日多相流方法,考虑真实流场中存在的液滴气动破碎、液滴颗粒间碰撞形态和液滴-壁面作用形成水膜的影响,建立压气机内气液两相非定常蒸发冷却的数值模型;利用快速傅里叶变换的频域功率谱密度方法揭示液滴汽化过程所诱发流场在时间和空间上非平衡的脉动规律,对比分析不同雾化冷却参数对气动的敏感性。

2 物理模型及方法

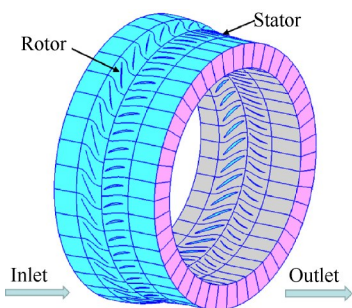
2.1 计算模型及边界条件

航空发动机内气液两相掺混冷却是一个非常复杂的物理演化过程,由单相空气演变为空气、雾滴颗粒及水蒸汽的多相混合流动工质,进而改变压气机的气动性能。为了揭示气液非平衡相变冷却过程对气动脉动的敏感性,选用地面试验的高压比NASA Stage-35压气机级^[24]为计算域,其原型几何参数和设计点性能参数如表1所示。通过简化,图1给出Stage-35压气机级的整周计算域。根据表1数据,指定压气机进口为总温总压、出口为平均静压的边界条件,环形流域交接面设定为周期性边界条件,转子和静子的交接面采用混合平面法实现周向时均的流场信息传递,并且所有壁面设置为绝热无滑移边界^[25]。

压气机的主流为干空气,设定雾滴以均匀喷射、颗粒大小随机分布的方式进入压气机内,雾化量(水/气比)定义为液态水质量流量与干空气质量流量的比值。液滴表面张力为0.073N/m、水温为288.15K、

Table 1 Characteristic parameters of NASA Stage-35 compressor at design conditions

Parameter	Value
Rotation/(r/min)	17188.7
Stator blade number	36
Rotor blade number	46
Span-chord ratio of rotor blade	1.19
Span-chord ratio of stator blade	1.26
Blade height of rotor blade/mm	76.2
Blade height of stator blade/mm	54.2
Tip clearance/mm	0.408
Hub ratio	0.7
Mass flow/(kg/s)	20.188
Total pressure ratio	1.82
Total temperature ratio	1.22
Total pressure of at inlet/Pa	101325
Total temperature of at inlet/K	288.15
Static pressure of outlet/Pa	138164
Efficiency/%	82.8

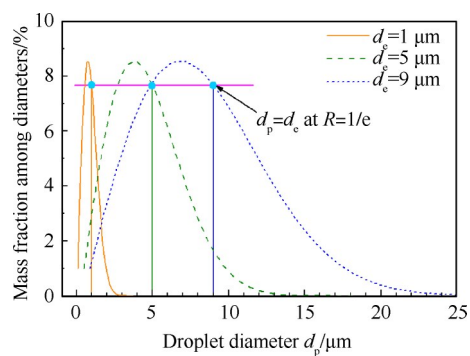
**Fig. 1** Calculation domain of a full stage of NASA Stage-35 compressor

射流速度为 50m/s,并设定空气与水蒸汽的热力物性(比热容、动力粘度和导热系数)仅随温度变化的函数。为表征喷嘴雾化时不同液滴粒态呈离散非均匀分布的真实现象,Rosin 等^[26]基于大量试验分析提出了喷嘴雾化粒径分布的规律,即 R - R 平均粒径 d_c 。则各液滴的质量流量沿其颗粒直径分布权重的分散规律可确定为

$$R = \exp \left[- \left(d_p / d_c \right)^\gamma \right] \quad (1)$$

式中 R 为小于颗粒直径 d_p 时累积质量分数; γ 表征液滴颗粒扩散程度的分散指数,对于液态水时,取值 $\gamma=2$ 。

图 2 为本文所提到的雾化粒径均服从 R - R 平均粒径的分散规律,并采用较小的雾化粒径来提高流场的冷却效果。

**Fig. 2** Droplet size distributions of initial mist injection by a nozzle at different R - R mean diameters

2.2 控制方程

液滴与周围空气对流换热而使液滴达到饱和温度,并在吸收汽化潜热作用下相变引起液滴蒸发,在这过程中液滴与空气发生热量和质量传输,同时液滴汽化为水蒸汽伴随着单向传质的蒸发过程。为此,针对压气机内气-液两相流动的特征,将气相的干空气和水蒸汽(二者混合称为湿空气)视为连续相、雾滴颗粒视为离散相,应用欧拉法求解湿空气连续相控制方程、拉格朗日法求解离散相雾滴颗粒运动、传质、传热的控制方程,并通过 Navier-Stokes 方程组源项实现连续相和离散相之间质量、动量和能量的耦合作用,控制方程见文献[11]。雾滴与气流存在速度差(u_s)变化,其运动规律受到压气机内各种作用力的约束,运动方程为

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_P + \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_{VM} \quad (2)$$

式中 m_p 为液滴颗粒质量; $\mathbf{u}_p$ 为液滴颗粒速度; $\mathbf{F}_D$ 是气流作用在液滴颗粒上施加的气动拖拽力(即气动阻力); $\mathbf{F}_B$ 是液滴颗粒的浮力项; $\mathbf{F}_T$ 是流场湍流流动对液滴的作用而产生的液滴湍流耗散力; $\mathbf{F}_R$ 为是由于流场内旋转运动作用于液滴的离心力或科氏力,当主流无旋转运动时可忽略该受力; $\mathbf{F}_P, \mathbf{F}_{VM}$ 分别为压力梯度力和虚拟质量力,当连续相密度大于离散相密度时二者受力作用明显。

液滴颗粒特性(如射流角、速度和粘度)和壁面特性(如材料、温度和粗糙度)直接影响壁面液膜的厚度、形状和运动。当雾滴连续进入压气机内,易粘附在内壁形成液膜,如图 3 所示。

采用 Elsaesser 液滴-壁面作用模型^[27]模拟壁面沉积液膜的热力现象,由壁面温度和液滴韦伯数来界定液滴撞壁后所呈现粘附、铺展、破碎、反弹、反弹破碎或喷溅的液滴形态。

壁面液膜的质量守恒控制方程定义为

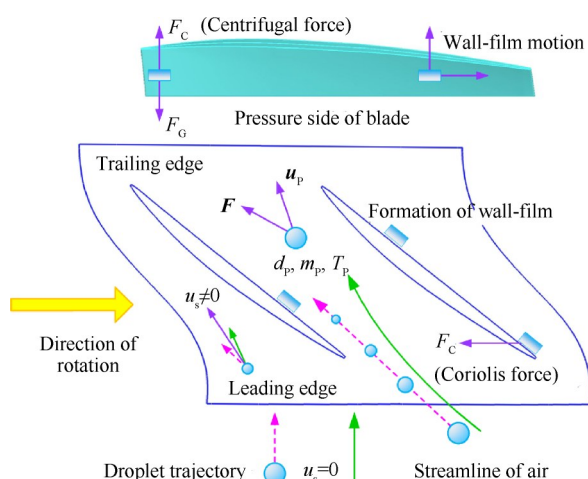


Fig. 3 Schematic diagram of droplet movement trajectory and water-film formation in the compressor

$$\frac{\partial \rho_p h_p}{\partial t} + \nabla_{\text{sur}} \cdot (\rho_p h_p \mathbf{u}_p) = \dot{m}_s \quad (3)$$

式中 ρ_p 和 h_p 分别为液滴颗粒的密度和高度; ∇_{sur} 为液膜粘附于所在壁面区域内的梯度算子。

壁面液膜的动量守恒控制方程确定为

$$\frac{d\rho_p h_p \mathbf{u}_p}{dt} + \nabla_{\text{sur}} \cdot (h_p p_t) = \tau_{\text{mix}} \mathbf{I}_{\text{mix}} + \tau_{\text{wall}} \mathbf{I}_{\text{wall}} + \mathbf{P}_{\text{imp}} - M_{\text{imp}} \mathbf{u}_p + \rho_F h_F (\mathbf{g}_{\text{mix}} - \mathbf{g}_{\text{wall}}) \quad (4)$$

式中 p_t 为作用在液膜表面的总压力; 等号右侧最后一项为液膜的体积力; $\mathbf{g}_{\text{mix}}$ 和 $\mathbf{g}_{\text{wall}}$ 分别为湿空气和壁面液膜运动的重力加速度; $\mathbf{P}_{\text{imp}}$ 和 M_{imp} 分别为作用于液膜表面的冲击压力和冲击质量; τ_{wall} 为壁面的剪切力; τ_{mix} 为湿空气对液膜表面的剪切力; $\mathbf{I}_{\text{wall}}$ 为液膜与壁面相对运动方向上单位向量; $\mathbf{I}_{\text{mix}}$ 为湿空气对液膜表面方向上单位向量。

壁面液膜能量守恒控制方程为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_{\text{cond},p} + Q_{\text{conv},p} + Q_{\text{vap},p} \quad (5)$$

式中 c_p 为液滴的定压比热容; $Q_{\text{cond},p}$ 、 $Q_{\text{conv},p}$ 和 $Q_{\text{vap},p}$ 分别代表来自壁面处的导热项、来自湿空气侧的热对流项和来自液滴颗粒蒸发潜热项。

利用计算流体力学 CFX 19.0 商业代码, 通过有限体积法求解 Navier-Stokes 方程组, 计算精度为二阶迎风格式, 并联合湍流模型封闭方程。当单相或多相流场的求解残差值小于 1×10^{-4} 且残差曲线波动平稳时, 认为求解满足精度要求。

2.3 计算结果的准确性检验

由于欧拉-拉格朗日多相流颗粒追踪方法利用样本数来追踪一部分实际数量的颗粒运动, 为了确定颗粒样本数能准确反映液滴的流动和蒸发特征,

图4给出动静域交接面颗粒样本数率对水蒸汽质量分数的敏感性检验。在样本颗粒数率 $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 之后, 水蒸汽质量分数基本保持不变; 相对于局部最高的颗粒数率 $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 时, 二者在交界面水蒸汽质量分数的误差仅为 0.072%, 表现出该颗粒数率对捕捉液滴蒸发特征具有很高的精度。根据该计算域入口的网格尺度, 本文确定样本颗粒数率为 $2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。

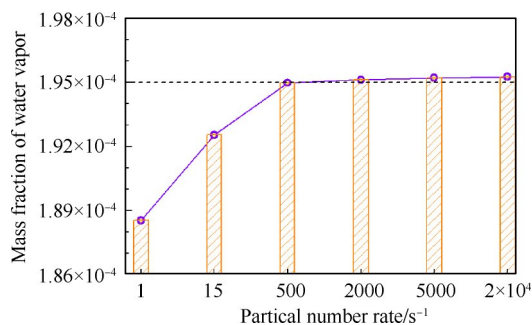


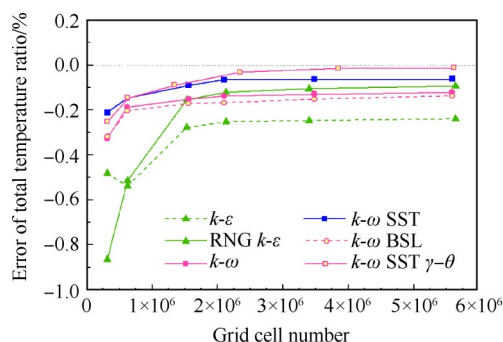
Fig. 4 Sensitivity analysis of particle tracking number to water vapor mass fraction

为满足数值计算精度和更好地捕捉流场特征, 图5针对不同计算网格和湍流模型对求解结果的精确度进行分析。由于近壁面粘性底层和过渡层中, 主要是由粘性力起主导作用, 惯性力的作用几乎可以忽略, 认为该区域边界层内粘性力和速度梯度呈线性关系^[28]。对高雷诺数湍流模型($k-\varepsilon$ 和 RNG $k-\varepsilon$ 模型)的近壁无量纲距离平均 y^+ 值确定在 30~300 内, 使近壁面第一层网格节点位于湍流核心区, 粘性底层和过渡层不布置网格节点, 该区域流场流动物理量采用壁面函数进行经验计算。而对低雷诺数湍流模型($k-\omega$, $k-\omega$ SST, $k-\omega$ BSL 和 $k-\omega$ SST $\gamma-\theta$ 模型)的近壁平均 y^+ 值确定在 1 以内, 在粘性子层至少布置 10~15 层网格节点。

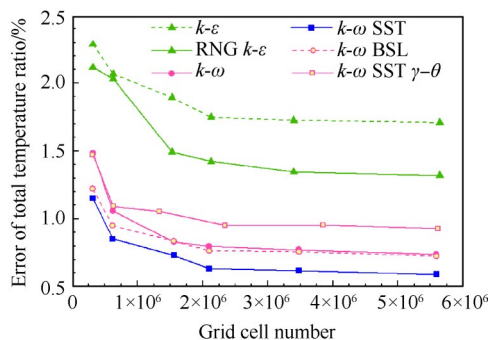
由图5分析可知, 尽管这六种湍流模型都可以很好地预测压气机性能参数, 但是采用低雷诺数湍流模型具有更小的相对误差, 特别是 $k-\omega$ SST 湍流模型。同时, 网格单元总数约 210 万之后, 网格数对数值求解结果的敏感性影响基本维持不变。为此, 本文选用 $k-\omega$ SST 湍流模型和 210 万网格单元数, 可以满足求解精度和计算量之间达到一个最佳的平衡。

2.4 非定常计算方法

由于粘附在壁面的水膜是离散液滴汇集的过程, 认为壁面液膜的形成是一个瞬态过程。通过时间步长对捕捉流场特征的敏感性检验发现, 当干工况和湿工况的时间步长 Δt 分别确定为 $3.2321 \mu\text{s}$ 和 $1.2120 \mu\text{s}$ 时, 可满足计算量和结果独立性的综合要



(a) Relative error of total temperature ratio



(b) Relative error of compressor efficiency

Fig. 5 Sensitivity comparison of compressor characteristics parameters at different grid cell numbers and turbulence models

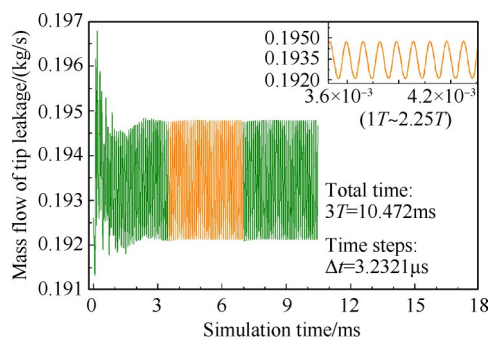
求。图6给出干、湿工况时叶顶间隙泄漏量随时间变化的特征。动叶旋转周期为 $T=3.49\text{ms}$, 在第二个周期以后, 受初场的干扰逐渐减弱, 泄漏量呈稳定变化。干/湿工况下泄漏量分别在第二个和第三个旋转周期开始, 流场呈现有规律的周期性变化。为减少计算量, 干、湿工况非定常求解的总时间分别为 $2T$ 和 $3T$, 并在最后一个周期内设置随每个时间步长输出瞬态结果。

为捕捉气液相变蒸发冷却对流场非平衡态时气动脉动的敏感性程度, 基于快速傅里叶变换方法的时间演变流场分析。将一个旋转周期内离散的瞬态结果(样本数量为偶数 N)作为时序信号源(φ_n), 则样本的频率 f_n 定义为

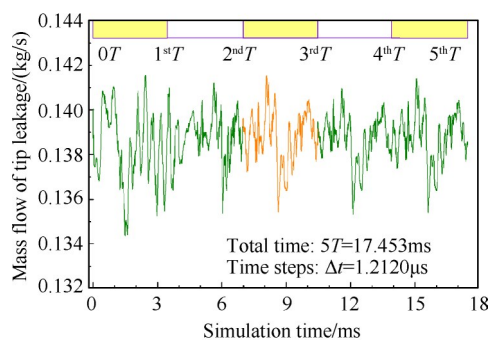
$$f_n = \frac{n}{N \cdot \Delta t} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

通过傅里叶变换分析, 获得流场参数与时间相关, 并分解成一个等效的正弦信号总和。由此, 将离散 FFT 算法将时序信号表示为一个有限的三角级数, 即

$$\varphi_k = \bar{\varphi}_0 + \sum_{n=1}^{N-1} \bar{\varphi}_n e^{2\pi i k n / N} = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{\varphi}_n e^{2\pi i k n / N} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (7)$$



(a) Dry air case



(b) Wet air mixture case

Fig. 6 Periodic analysis of tip leakage flow rate under the dry air and wet air mixture conditions

式中 $\bar{\varphi}_0$ 表示 $f=0$ 时 FFT 平均值; 第一个等号右侧第二项为时序信号偏离平均值的脉动量; $\bar{\varphi}_n$ 为三角级数的系数。

$$\bar{\varphi}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \varphi_k e^{-2\pi i k n / N} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (8)$$

用功率谱密度 (PSD) 表示频率域中信号功率的分布, 表征流场时序信号的脉动强度, 单位是信号强度的平方与频率的比值, 表达式为

$$PSD(f_n) = E(f_n) / \Delta f \quad (9)$$

式中 Δf 表示离散的频谱中频率步长; $E(f_n)$ 为傅里叶模式功率。

$$E(f_n) = \begin{cases} 2(\bar{\varphi}_n)^2 & (n = 1, 2, \dots, 0.5N-1) \\ (\bar{\varphi}_n)^2 & (n = 0.5N) \end{cases} \quad (10)$$

3 结果及讨论

3.1 雾化冷却对流场非定常特征分析

为分析压气机内气流的非定常特征, 下面分析以雾化量 2%, 雾化粒径 $5\mu\text{m}$ 的雾化冷却参数为例。图7为对比雾化冷却前后流场流线的温度云图。由图可知, 雾化冷却后流场的温度明显降低, 动叶流域的温降程度大于静叶流域, 表现出动叶流域具有更强的气液传热能力。在压气机内高逆压梯度、高速

旋转的作用下,使流场温度云图沿径向呈现不均匀分布。由于流场中每个雾滴均可视为蒸发冷却源,液滴颗粒直径的不均匀分布增加了湿空气温度场分布和温降程度的不均匀性,从而也诱发气-液两相流场的非定常特征。

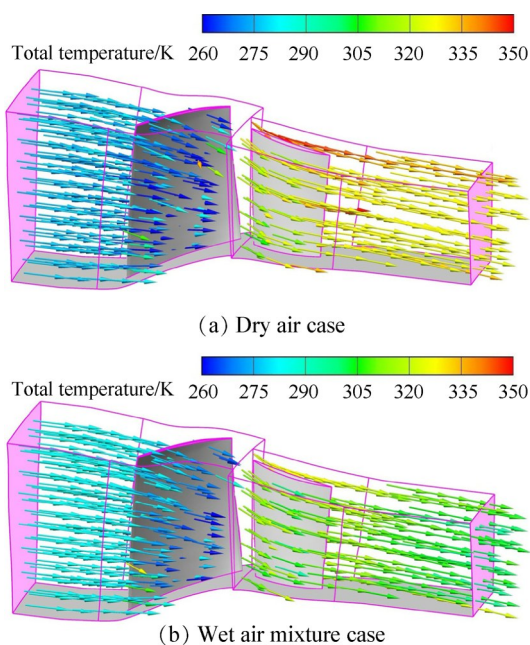


Fig. 7 Temperature contours of dry air and wet air streamlines in the compressor

图8为压气机内雾滴蒸发传热传质的热力模型。当雾滴进入压气内发生汽化蒸发的过程中,吸收空气中的热量主要用于液滴非平衡传热和液滴平衡传热两个阶段,液滴与空气这种传质传热现象会引起流场在时间和空间上的非平衡脉动特征。一方面,由于冷却水以喷嘴雾化形式突然进入压气机内,这时周围空气的温度会发生突降,来自空气的热量用于提升液滴自身的温度,这部分热量称为液体热;随后雾滴继续吸收热量,这部分热量称为汽化潜热,并伴随着雾滴表面发生蒸发现象,将这种雾滴随时间演化产生汽化蒸发的现象定义为时间上气液非平衡蒸发冷却的特征。另一方面,雾滴进入流场初期时迅速吸收周围空气的热量,然而在压气机高速旋转和来流作用下,强逆压梯度场使雾滴受到气流很强的随流惯性力,其气液相界面还未来得及发生蒸发相变,但高速随流后在流场其他区域发生了汽化蒸发,将这种雾滴随空间演化而发生汽化蒸发的现象定义为空间上气液非平衡蒸发冷却特征。

图9显示一个旋转周期内喷雾冷却前后压气机性能参数的时域波动情况。由图可以证实,压气机

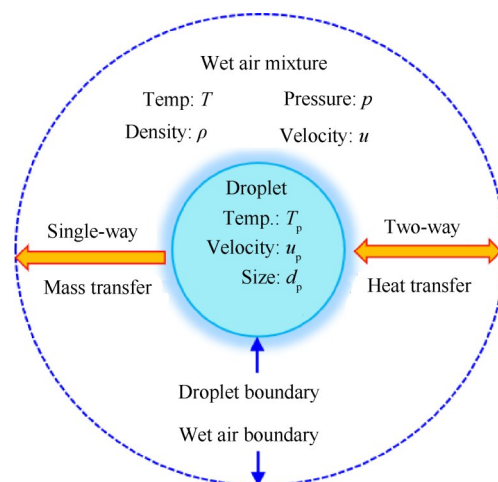


Fig. 8 Thermodynamic diagram of heat and mass transfer by droplet evaporation

内雾滴非平衡相变冷却现象易引起压气机性能参数的非定常脉动,而干工况时性能参数无明显脉动现象,呈现定常稳定运行。在一个旋转周期内,射流冷却后平均总压比为1.779,平均总温比为1.159,相对于干工况分别降低了1.97%和2.05%;而湿工况时平均效率为83.16%,比干工况时增加了0.95%。可见,加湿冷却后压气机总温比和效率增加了,而总压比降低了。一方面,由于雾滴蒸发冷却后,流场温度降低、空气密度增加,并且空气与水蒸汽混合形成湿空气,使连续相气流的质量流量增加;另一方面,流动工质由于干空气转为湿空气时气体常数增大、比热容增加,压气机扭矩降低,引起比压缩耗功减少,进而压气机总压比降低、效率提高。

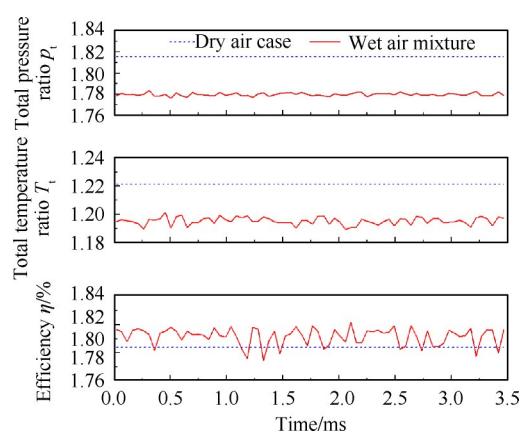


Fig. 9 Time-domain fluctuation of performance parameters of compressor at dry/wet air conditions

为进一步分析气液相变蒸发冷却在时间和空间上非平衡过程对压气机性能脉动的敏感性程度,将特性参数的时域脉动转化为频域功率谱密度分析。图10给出干、湿工况下一个旋转周期内压气机性能

参数的功率谱密度分布。由图可知,干/湿工况下流场性能参数的功率谱密度高值区主要位于低频区,表明高值脉动的次数较少;并且湿空气流场特性参数的功率谱密度显著增大,在干工况时一个旋转周期内压气机总压比、总温比和效率功率谱密度的平均值分别为 2.35×10^{-16} , 3.22×10^{-17} , $4.88 \times 10^{-16} \text{ Hz}^{-1}$ (图 10(a)), 湿工况时对应增加到 5.50×10^{-9} , 6.77×10^{-8} , $2.40 \times 10^{-4} \text{ Hz}^{-1}$ (图 10(b))。由流场特性的脉动程度的定量评估可知,雾滴在干空气非平衡蒸发效应的作用下,压气机内流场呈现非常复杂的气动脉动,表明气雾冷却过程对流场性能波动具有显著的敏感性。

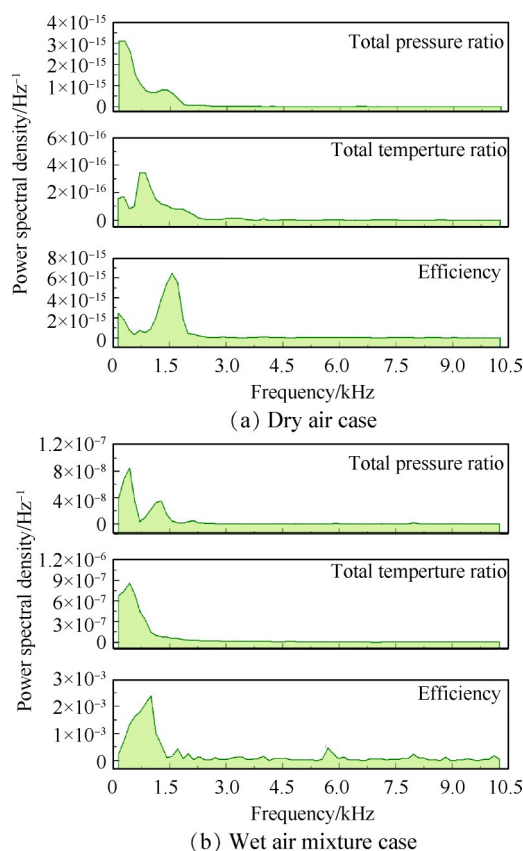


Fig. 10 Power spectral density distributions of compressor performance parameters at dry/wet air conditions

3.2 雾化量对流场脉动特性的敏感性分析

为揭示雾滴浓度对压气机特性敏感性的影响程度,以雾化平均粒径 $d_e = 5 \mu\text{m}$ 为例,分析雾化量 0.5%~5% 范围时流场脉动特征。

图 11 给出不同雾化量时压气机总压比在一个周期内频域功率谱密度的分布。随着雾化量由 0.5% 增加到 5% 时,一个周期内累积总压比功率谱密度由 $1.09 \times 10^{-6} \text{ Hz}^{-1}$ 升高到 $3.66 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1}$, 则标准差对应为 5.80×10^{-8} , 1.61×10^{-8} 和 $1.49 \times 10^{-8} \text{ Hz}^{-1}$ 。对比可知,在雾化量 0.5% 时总压比功率谱密度累积值接近雾化量为

5% 时的三倍,表现出低雾化量时压气机的压比时域波动更大,即雾化量越低时压气机总压比时域内脉动具有更大的敏感性。这是因为,随着雾滴浓度的增加,水蒸汽分压力对湿空气总压力的贡献份额增大,有利于降低气-液传热时流场压比的脉动强度;而湿空气总压增加使压气机内流场逆压梯度升高,压气机实际/等熵压缩耗功也会随着射流浓度的增加而降低,使压气机压缩功对气流做功量降低,减小对气流的作用。由此可见,当雾化量较大时,有利于降低流场压力的脉动强度。

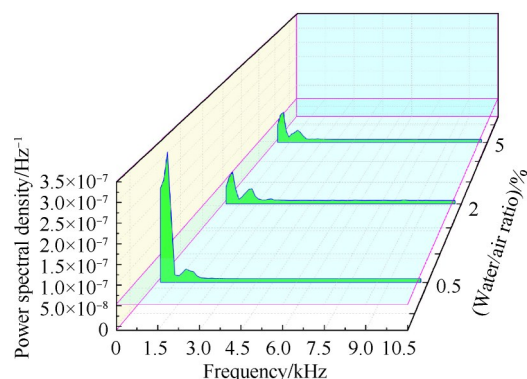


Fig. 11 Power spectral density distributions of total pressure ratio at different water/air ratios

图 12 为不同雾化量时压气机总温比的频域分布。随着雾滴浓度的增加,一个周期内累积总温比功率谱密度由 4.99×10^{-6} (雾化量 0.5%) 降低到 3.81×10^{-6} (雾化量 5%); 同时,总温比功率谱密度的标准差在雾化量为 0.5%, 2% 和 5% 时分别为 2.17×10^{-7} , 1.79×10^{-7} 和 $1.61 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-1}$ 。也就是说,雾化量 5% 时一个周期内压气机总温比脉动程度降低为雾化量 0.5% 时的 74.2%, 进一步说明雾滴浓度较低时压气机总温比脉动具有更强的敏感性。由此可知,随着雾滴浓度的增加,有利于降低气-液传热过程流场总温比的脉动强度。

图 13 呈现压气机内不同雾滴浓度对湿压缩效率脉动的敏感性。在雾化量为 0.5%, 2% 和 5% 时,一个周期内累积湿压缩效率功率谱密度分别为 0.0166, 0.0122 和 0.02 Hz^{-1} , 其频域内效率功率谱密度的标准差分别为 6.13×10^{-4} , 4.83×10^{-4} 和 $8.62 \times 10^{-4} \text{ Hz}^{-1}$ 。这种现象说明,湿压缩效率的脉动强度随雾化量增加分别呈现“先降低(雾化量 0.5%~2%)、再升高(雾化量 2%~5%)”的单调变化;并且,当雾化量 0.5% 时湿压缩效率脉动强度降低约为雾化量 5% 时的 71%。由标准差分析可知,在射流浓度较高时(如 5%)湿压缩效率时域内脉动的敏感性更大。

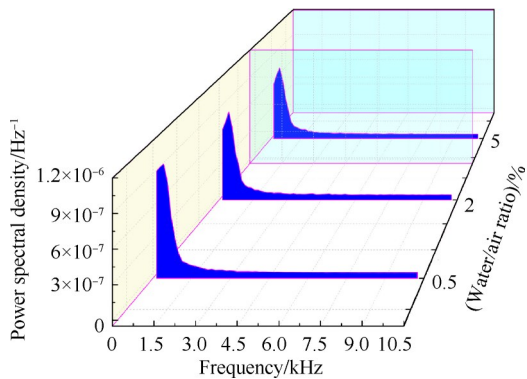


Fig. 12 Power spectral density distributions of total temperature ratio at different water/air ratios

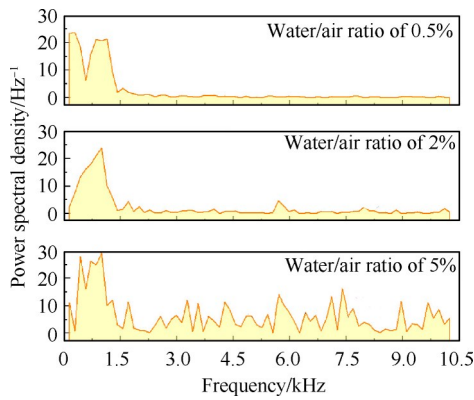


Fig. 13 Power spectral density distributions of compression efficiency at different water/air ratios

由表 2 可知,在喷嘴雾化平均粒径为 $d_e=5\mu\text{m}$ 时,随着雾滴浓度增加,压气机总温比呈现线性单调递减,而总压比和效率呈现非线性变化。可以得知,在压气机内高逆压梯度、壁面液膜和液滴相变等因素综合作用下,雾滴非平衡相变蒸发冷却增加了流场脉动的敏感性,特别是对总压比和效率非定常脉动的复杂性。

Table 2 Sensitivity of water/air ratio on compressor characteristic parameters

Cases	(Water/air ratio)/%	p_t	T_t	η /%
Dry air	—	1.816	1.22	82.38
	0.5	1.769	1.203	82.96
Wet air	2	1.779	1.197	83.64
	5	1.774	1.191	82.56
Trend		Nonlinear	Linear	Nonlinear

3.3 雾化粒径对流场脉动特性的敏感性分析

为揭示雾滴直径对压气机特性敏感性的影响程度,以雾化量 2% 为例,分析雾化平均粒径为 $d_e=1\sim 9\mu\text{m}$ 时流场时域瞬态脉动的特征。

图 14 给出不同雾化平均粒径时总压比功率谱密度分布。由图可知,一个旋转周期的频域内总压比功率谱密度的标准差在 $d_e=1, 5, 9\mu\text{m}$ 时分别为 $3.90\times 10^{-8}, 1.61\times 10^{-8}, 1.82\times 10^{-8}\text{Hz}^{-1}$, 表现为较小的雾化颗粒直径对总压比时域脉动更为敏感,呈现出较大的脉动。这是由于,雾滴平均粒径越小时,其吸收潜热的蒸发效率越高,水蒸汽分压力贡献的份额增大,表现为较小的雾化平均粒径时压气机总压比具有更大的脉动现象;反之,较大的雾化平均粒径具有更小的压比脉动。结合图 11 可知:(1)在较低的雾化量(如 0.5%)时所诱发时域总压比的脉动敏感程度大于较小的雾化平均粒径(如 $d_e=1\mu\text{m}$);(2)在较高的雾滴浓度(如 5%)时所诱发时域总压比的脉动敏感程度小于较大的雾化平均粒径(如 $d_e=9\mu\text{m}$)。

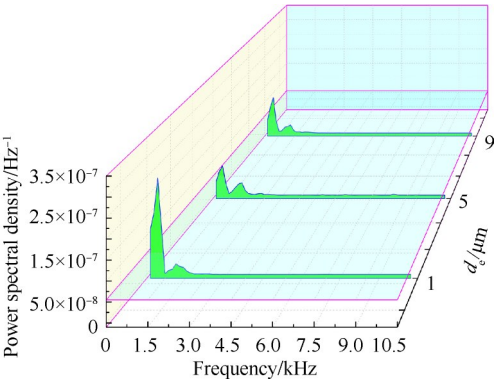


Fig. 14 Power spectral density distributions of total pressure ratio at different mist particle mean sizes

图 15 分析不同 d_e 对压气机总温比时域脉动的敏感性。在一个旋转周期的频域内压气机总温比功率谱密度的标准差在雾化平均粒径 $d_e=1, 5$ 和 $9\mu\text{m}$ 时分别为 $1.46\times 10^{-7}, 1.79\times 10^{-7}$ 和 $2.03\times 10^{-7}\text{Hz}^{-1}$, 说明较大的 d_e 对总温比时域内脉动更为敏感,呈现较大的时域脉动。可见,压气机总温比脉动强度在 $d_e=1\mu\text{m}$ 时降低到 $d_e=9\mu\text{m}$ 时的 71.92%, 表现为在较小的 d_e 时具有较弱的时域温升波动。结合图 12 分析可知,在较低雾滴浓度(如 0.5%)时所引起总温比的时域脉动大于较小雾化平均粒径(如 $d_e=1\mu\text{m}$);反之,在较高雾滴浓度(如 5%)时所引起总温比的时域脉动程度小于较大的雾化平均粒径(如 $d_e=9\mu\text{m}$)。

图 16 对比不同雾化平均粒径时频域内湿压缩效率功率谱密度分布。随 $d_e=1\mu\text{m}$ 增大到 $d_e=9\mu\text{m}$ 时,频域内效率功率谱密度的标准差在 $d_e=1, 5$ 和 $9\mu\text{m}$ 时分别为 $4.28\times 10^{-4}, 4.83\times 10^{-4}$ 和 $4.81\times 10^{-4}\text{Hz}^{-1}$, 效率的脉动程度呈现“先降低后增加”的趋势特征;在 $d_e=1\mu\text{m}$

时,效率的脉动强度约降低到 $d_e=9\mu\text{m}$ 时的89%。这一现象说明,较大的雾化平均粒径(如 $d_e=9\mu\text{m}$)对湿压缩效率时域内脉动更为敏感。同时,结合图13分析可知,雾化量对湿压缩效率的时域脉动程度要大于雾化粒径。

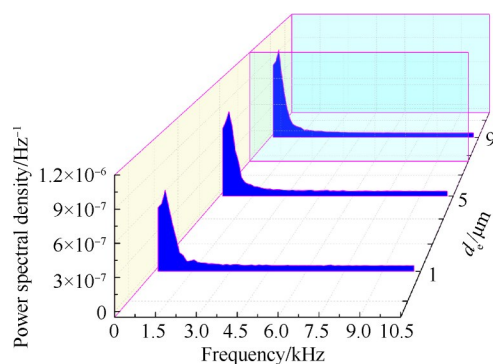


Fig. 15 Power spectral density distributions of total temperature ratio at different mist particle mean sizes

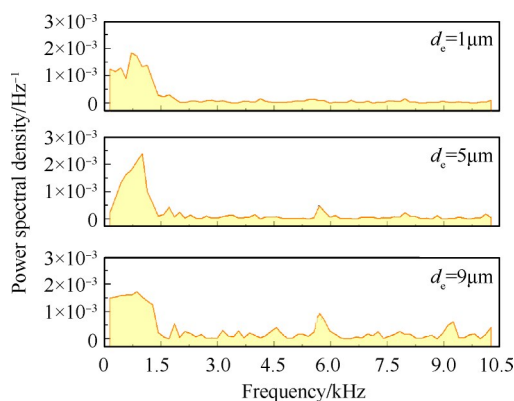


Fig. 16 Power spectral density distributions of compressor efficiency at different mist particle mean sizes

由表3可知,在雾化量为2%时,随着 d_e 增大,压气机总温比呈现线性单调递增,而总压比和效率呈现非线性关系。由此说明,雾化粒径对压气机总压比和效率的脉动具有很强的非正常特征。

Table 3 Sensitivity of mist particle mean sizes on compressor characteristic parameters

$d_e/\mu\text{m}$	p_t	T_t	$\eta/\%$
1	1.766	1.186	82.68
5	1.779	1.197	83.64
9	1.778	1.201	82.59
Trend	Nonlinear	Linear	Nonlinear

综上分析结果,将有利于了解高速涡轮发动机进气射流过量时,未完全蒸发的雾滴对下游压气机性能的敏感性程度;并有利于指导高速涡轮发动机进气射流冷却的设计与射流方案。

4 结论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)在高逆压梯度力和强随流惯性力作用下,压气机内液滴汽化蒸发冷却易诱发在时间和空间上气液非平衡蒸发相变的特征。在时域旋转周期内,干空气来流时压气机特性参数呈现定常稳定工作;而来流雾化冷却时,其性能参数呈现复杂且非正常的气动脉动。

(2)压气机内雾化冷却后,流动工质由于干空气演化为湿空气后,温度降低、气流质量流量增加;同时气体常数增大、比热容增加,减少压气机耗功。一方面会降低压气机总压比,另一方面会提高压气机的总温比和湿压缩效率。并且,雾化冷却参数对总温比变化成线性关系,而与总压比和效率变化均成非线性关系。

(3)基于快速傅里叶变换方法将压气机性能参数时域波动强度转化为功率谱密度的直观分析可知,雾化量和雾化粒径对总压比、总温比和效率在时域内波动的敏感性程度不同。在较低的雾化量或较小的雾化粒径时时域总压比的脉动敏感性更强;在较低的雾化量或较大雾化粒径时时域总温比的脉动敏感性更强;而在较高的雾化量或较大的雾化粒径时时域效率脉动敏感性更明显。

(4)针对一个旋转周期频域内压气机性能参数功率谱密度的标准差,在雾化量0.5%~5%和雾化平均粒径1~9 μm 内分别为 $1.49\times 10^{-8}\sim 8.62\times 10^{-4}\text{Hz}^{-1}$ 和 $1.61\times 10^{-8}\sim 4.83\times 10^{-4}\text{Hz}^{-1}$ 。可见,雾化冷却量变化对湿压缩过程中流场的时域脉动敏感性程度大于雾化粒径变化。

致谢:感谢国家科技重大专项基金和中央高校基本科研业务费专项资金资助;感谢西北工业大学旋转盘腔流动传热实验室的支持。

参考文献

- [1] 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.)
- [2] 尚守堂,田方超,扈鹏飞. 涡轮发动机射流预冷关键技术分析[J]. 航空科学技术, 2018, 29(1): 1-3.
- [3] Wang Z G, Wang Y, Zhang J Q, et al. Overview of the Key Technologies of Combined Cycle Engine Precooling

- Systems and the Advanced Applications of Micro-Channel Heat Transfer[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2014, 39: 31-39.
- [4] Carter P, Balepin V, Spath T, et al. MIPCC Technology Development[R]. AIAA 2003-6929.
- [5] Trout A M. Theoretical Turbojet Thrust Augmentation by Evaporation of Water During Compression as Determined by Use of Mollier Diagrams[R]. NACA-TN-2104, 1950.
- [6] Henneberry H, Snyder C. Analyses of Gas Turbine Engines Using Water and Oxygen Injection to Achieve High Mach Numbers and High Thrust[R]. NASA/TM-1993-106270.
- [7] Mehta U, Bowles J, Melton J, et al. Water Injection Pre-Compressor Cooling Assist Space Access[R]. AIAA 2012-5922.
- [8] Carter P, Balepin V. Mass Injection and Precompressor Cooling Engines Analyses[R]. AIAA 2002-4127.
- [9] Balepin V, Liston G. The Steam Jet: Mach 6+ Turbine Engine with Inlet Air Conditioning[R]. AIAA 2001-3238.
- [10] 薛亮波, 孙波, 卓长飞, 等. 预冷对发动机进气道流动特性影响的数值模拟研究[J]. 推进技术, 2020, 41(6): 1227-1236. (XUE Liang-bo, SUN Bo, ZHUO Chang-fei, et al. Numerical Simulation Study of Effects of Precooling on Flow Characteristics of Engine Inlets[J]. 2020, 41(6): 1227-1236.)
- [11] Lin A Q, Zheng Q, Fawzy H, et al. Effect of Water Injection Cooling on Flow Field Characteristics in the Cooling Section of Precooled Turbine-Based Combined Cycle Engine [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 615-626.
- [12] Lin A Q, Zhou J, Fawzy H, et al. Evaluation of Mass Injection Cooling on Flow and Heat Transfer Characteristics for High-Temperature Inlet Air in a MIPCC Engine [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 620-630.
- [13] Chaker M, Meher-Homji C B, Mee T, et al. Inlet Fogging of Gas Turbine Engines, Part I: Fog Droplet Thermodynamics, Heat Transfer, and Practical Considerations [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2004, 126: 413-428.
- [14] Kim K H, Ko H J, Kim K, et al. Analysis of Water Droplet Evaporation in a Gas Turbine Inlet Fogging Process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 33-34: 62-69.
- [15] 涂洪妍, 邓远灏, 康松, 等. 水气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.)
- [16] 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.
- [17] Johnson M V, Zhu G S, Aggarwal S K, et al. Droplet Evaporation Characteristics Due to Wet Compression under RCM Conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, 53: 1100-1111.
- [18] Novelo D A B, Igie U. Aero Engine Compressor Cooling by Water Injection, Part 1: Evaporative Compressor Model[J]. *Energy*, 2018, 160: 1224-1235.
- [19] Novelo D A B, Igie U. Aero Engine Compressor Cooling by Water Injection, Part 2: Performance and Emission Reductions[J]. *Energy*, 2018, 160: 1236-1243.
- [20] Roumeliotis I, Mathioudakis K. Evaluation of Water Injection Effect on Compressor and Engine Performance and Operability[J]. *Applied Energy*, 2018, 87: 1207-1216.
- [21] Mohapatra A K, Sanjay. Thermodynamic Assessment of Impact of Inlet Air Cooling Techniques on Gas Turbine and Combined Cycle Performance [J]. *Energy*, 2014, 68: 191-203.
- [22] Lin A Q, Zheng Q, Jiang Y T, et al. Sensitivity of Air/Mist Non-Equilibrium Phase Transition Cooling to Transient Characteristics in a Compressor of Gas Turbine[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 882-894.
- [23] Lin A Q, Sun Y G, Zhang H, et al. Fluctuating Characteristics of Air-Mist Mixture Flow with Conjugate Wall-Film Motion in a Compressor of Gas Turbine[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 142: 779-792.
- [24] Reid L, Moore R D. Design and Overall Performance of Four Highly-Loaded, High-Speed Inlet Stages for an Advanced, High-Pressure-Ratio Core Compressor [R]. NASA TP-1337, 1978.
- [25] Lin A Q, Liu G W, Xia Q Z, et al. Evaluation of Flow Loss near Wall Layer in a Compressor at Different Flight Dynamic Pressures [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2020, 10(20).
- [26] Rosin P, Rammler E. The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal [J]. *Journal of the Institute of Fuel*, 1933, 7: 29-36.
- [27] 宋云超. 气液两相流动相界面追踪方法及液滴撞击壁面运动机制的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [28] 尹松, 金东海, 朱芳, 等. 湍流模型对压气机数值模拟精度的影响[J]. 航空动力学报, 2010, 25(12): 2683-2689.