

有机混合工质对发动机进气冷却流场特性的影响研究

陆禹铭¹, 费红姿¹, 胡峰², 张海¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:为了解决高马赫数状态下压气机进气温度过高的问题,建立了气液两相流耦合模型,采用不同质量分数的乙醇、乙二醇作为冷却工质进行数值模拟,探究了有机工质质量分数和种类对预冷段流场换热效果、蒸发特性,阻力损失之间变化规律的影响。结果表明:蒸发率和蒸发量都会随着有机工质质量分数的增加而提高,其中乙醇溶液更佳,当质量分数由10%增加到50%时,蒸发效果提高约20%,且质量分数的变化规律与液气比互不影响;当有机物质量分数越低时,流场的温降效果越好,差值大小也取决于液气比,在液气比为3.3%条件下,10%与50%质量分数的乙醇溶液温降差值为3.15 K,乙二醇溶液为3.46 K;流场的压降损失受多个因素的共同影响,并非呈单一的线性关系,伴随着液气比的增加,高质量分数的有机工质可以减少压力损失,但在进气速度略低的条件下则相反;流场出口均匀度与溶液质量分数基本呈正相关,且易蒸发的工质如乙醇对均匀度的影响更大。

关键词:有机工质;喷雾冷却;蒸发;总压损失

中图分类号:V235.1

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.08.005

[引用本文格式]陆禹铭,费红姿,胡峰,等.有机混合工质对发动机进气冷却流场特性的影响研究[J].热能动力工程,2024,39(8):41-48. LU Yuming, FEI Hongzi, HU Feng, et al. Study on the effect of organic mixed working medium on the characteristics of engine inlet cooling flow field[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8):41-48.

Study on the Effect of Organic Mixed Working Medium on the Characteristics of Engine Inlet Cooling Flow Field

LU Yuming¹, FEI Hongzi¹, HU Feng², ZHANG Hai¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001;

2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: In order to solve the problem of high compressor inlet temperature under high Mach number, a coupling model of gas-liquid two-phase flow was established, and ethanol and ethylene glycol with different mass fractions were used as cooling working fluids for numerical simulation, and the effects of organic working medium mass fraction and type on heat exchange effect, evaporation characteristics and resistance loss in flow field of precooling section were explored. The results show that both the evaporation rate and evaporation amount increase with the increase of the mass fraction of organic working medium, in which ethanol solution has a best effect, when the mass fraction is increased from 10% to 50%, the evaporation effect is increased by about 20%, and the change of mass fraction has no influence on the liquid-gas ratio. The lower the mass fraction of organic matter, the better the temperature drop effect of the flow field, and the difference depends on the liquid-gas ratio. When the liquid-gas ratio is 3.3%, the difference between the temperature drop of ethanol solution and glycol solution between 10% and 50%

收稿日期:2023-12-01; 修订日期:2024-01-15

基金项目:哈尔滨工程大学高水平科研引导专项(3072022QBZ0302)

Fund-supported Project: Harbin Engineering University "High-level Scientific Research Guidance Project" (3072022QBZ0302)

作者简介:陆禹铭(1996-),男,哈尔滨工程大学博士研究生。

通信作者:张海(1983-),男,哈尔滨工程大学副教授。

mass fractions are 3.15 K and 3.46 K. The pressure drop loss of flow field is affected by many factors, and it is not a single linear relationship. With the increase of liquid-gas ratio, organic working medium with high mass fraction can reduce the pressure loss, but it is opposite under the condition of slightly lower intake speed. The outlet uniformity of the flow field is positively correlated with the mass fraction of the solution, and the evaporative working medium such as ethanol has a greater influence on the uniformity.

Key words: organic working medium, spray cooling, evaporation, total pressure loss

引 言

在高马赫数飞行条件下,进气温度的升高会对发动机的性能造成不良影响。早期的研究表明,质量喷射预压缩冷却(MIPCC)技术可以有效降低进气温度,避免性能恶化,拓展飞行包线^[1]。

射流预冷技术即是指通过射流装置向高温气流中注入冷却工质,借由介质的蒸发来降低气流温度^[2]。该技术在提高涡轮发动机性能方面的有效性已通过实验得到证实^[3]。Burkardt 等人^[4]对喷雾系统的布置进行了改进并论证了其效果。Bartolotta 等人^[5]将射流系统与涡轮发动机进行连接并试验,发现在较高马赫数下喷雾有助于提高航空发动机性能。Balepin 等人^[6]在此基础上进行了涉及进气道和 J85-5 涡喷发动机在内的全尺寸模拟试验,模拟的飞行速度从 1~3.5 Ma,试验数据表明,在喷油率为 0.6% 的情况下,射流预冷技术可以将推力提高约 14%,同时压气机内的温度降低了 130 K。Snyder 等人^[7]探索了不同比例液氧和水的混合物作为冷却介质的影响,并发现适量液氧的加入可以拓展发动机的飞行包线。Cater 等人^[8]研究发现,可以通过喷射不同组合的冷却剂来提高发动机性能,以水为主的冷却剂和氧化剂组成的冷却介质是最佳选择。在类似的研究中,适当的水和氧化剂混合物作为冷却剂,有利于极端条件下的燃烧^[9]。此外,射流装置和喷嘴的布置也会在一定程度上改变射流状态对温度、压力等流场特性的影响^[10-11]。因此,质量喷射预压缩冷却技术可以通过降低进气温度和增加推力对发动机性能产生显著的积极影响,值得进一步研究。

通过喷雾冷却可以在一定程度上提高压气机的输出功率^[12],但部分未完全蒸发的水滴会在部件中形成水膜,从而导致压气机性能的恶化^[13]。Lin 等人^[14-16]研究了液滴的蒸发冷却对压气机流场特性的影响,发现采用不同的喷雾条件可以提高压气机的性能,射流速度和粒径是影响换热蒸发过程的关键因素,并且这两个因素对压气机的温降和比功有显著影响。由于航空发动机的污染物排放中含有大量 NO_x ^[17],经过研究发现,由水蒸气和干燥空气组成的湿空气混合物更有利于减少 NO_x 的形成^[18]。因此,通过射流冷却可以降低压气机的排气温度,从而极大程度上减少 NO_x 的排放^[19]。Elwekeel 等人^[20]研究发现,冷却剂的温度和尺寸等特性也会对流场造成影响,随着液滴温度的升高,射流预冷的热效率将会降低。Kim 等人^[21]研究发现,当液滴尺寸减小的时候,蒸发速率和温降效果都会提高。

本文以高马赫数飞行时发动机进气温度过高的问题为基础,通过模拟飞行工况,建立气液两相流耦合模型。采用有机混合物(乙醇、乙二醇)作为冷却工质,分析了不同质量分数的有机工质对不同工况条件下预冷段流场和换热特性的影响,探究了有机工质质量分数、种类对换热效果、蒸发特性、阻力损失之间的变化规律的影响。

本文以高马赫数飞行时发动机进气温度过高的问题为基础,通过模拟飞行工况,建立气液两相流耦合模型。采用有机混合物(乙醇、乙二醇)作为冷却工质,分析了不同质量分数的有机工质对不同工况条件下预冷段流场和换热特性的影响,探究了有机工质质量分数、种类对换热效果、蒸发特性、阻力损失之间的变化规律的影响。

1 数值模拟方法

喷雾冷却即是利用压气机前的射流预冷装置对高温进气喷射低温冷却工质,其本质是利用空气与液滴之间热量和质量传递来降低温度。液滴蒸发冷却过程如图 1 所示。液滴射入后,会与气流发生碰撞,并随气流进行移动,液滴在与气流接触并开始吸收热量之后,达到蒸发温度发生相变,形成蒸汽,同时气流温度也得到降低。因此,本文将采用欧拉-拉格朗日数值模型对射流冷却过程进行耦合计算。

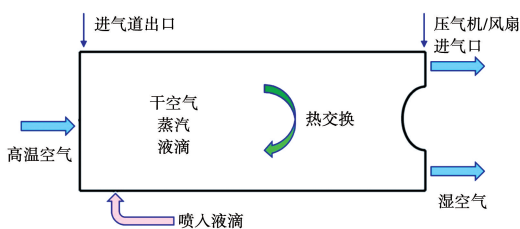


图 1 液滴蒸发冷却的过程

Fig. 1 Droplet evaporation and cooling process

1.1 连续相模型

将生成的蒸汽与空气的混合物视为连续相,采用欧拉法对湿空气混合物进行控制方程的求解。

(1)质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = S_m \tag{1}$$

式中: t —时间,s; ρ —空气和蒸汽混合物质的密度,kg/m³; $\vec{u}$ —速度,m/s; S_m —生成的蒸汽的质量转移量,kg。

(2)动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{\rho u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\bar{\tau}}) + \vec{F} \tag{2}$$

式中: p —表面压力,Pa; $\vec{F}$ —两相之间传输的外部体积力,N/kg; $\vec{\bar{\tau}}$ —连续相的粘性剪切应力张量,Pa。

(3)能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E_t) + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E_t + p)] = \nabla \cdot [\lambda \nabla T + (\vec{\bar{\tau}} \cdot \vec{u})] + \vec{u} \cdot \vec{F} + H_h \tag{3}$$

式中: E_t —总内能,J; λ —热传导率,W/(m·K); T —气体温度,K; H_h —热量传导,J。

1.2 离散相模型

(1)雾滴运动方程:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_B + \vec{F}_T + \vec{F}_p + \vec{F}_R + \vec{F}_{VM} \tag{4}$$

式中: m_p —液滴的质量,kg; u_p —液滴的速度,m/s; F_D —气流的拖拽力,N; F_B —浮力项,N; F_T —湍流耗散力,N; F_R —离心力或科氏力,N; F_p —压力梯度,Pa/m; F_{VM} —虚拟质量力,N。

(2)液滴传热方程:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p \lambda Nu (T - T_p) + \frac{dm}{dt} h_p \tag{5}$$

式中: c_p —液滴的比定压热容,J/(kg·K); T_p —液滴的温度,K; d_p —液滴粒径,m; Nu —努塞尔数; dm_p/dt —液滴的蒸发速度,kg/s; h_p —液滴的汽化潜热,J/kg。

(3)液滴质量传输方程:

液滴的蒸发可分为两种情形:在未饱和态下自然对流的蒸发以及沸腾状态下的强制对流蒸发。本文采用 Antoine 方程对液滴颗粒的饱和蒸汽压力进

行求解:

$$\log_{10} P_{sat} = A - \frac{B}{T + C - 273.15} \tag{6}$$

式中: p_{sat} —饱和蒸汽压力,Pa; A,B,C —常数,分别取值 11.779,3 885.704,230.23。

当液滴的温度低于沸点时,液滴的蒸发速率由自然对流换热决定:

$$\frac{dm_p}{dt} = \pi d_p \rho_p D_{H_2O} Sh \frac{M_{H_2O}}{M} \log \left(\frac{1 - f_p}{1 - f_{H_2O}} \right) \tag{7}$$

式中: D_{H_2O} —扩散系数; ρ_p —液滴的密度,kg/m³; M_{H_2O} —湿空气和蒸汽的摩尔质量,kg/mol; f_{H_2O}, f_p —蒸汽和液滴的摩尔分数,数值为 1; Sh —舍伍德数。

当液滴温度大于沸点时,蒸发速率由强制对流换热决定:

$$\frac{dm_p}{dt} = - \frac{\pi d_p \lambda Nu (T - T_p)}{h_{lh}} \tag{8}$$

2 数值模型及边界条件

2.1 物理模型与网格划分

图 2 为进气预冷段的物理模型,并在入口处架设喷雾支架。同时以结构化网格对预冷段进行划分,分别选取 750 万、1 000 万和 1 250 万的网格进行计算,并以出口处的总压分布情况进行判断。网格无关性验证如图 3 所示。可以看出,1 000 万和 1 250 万网格的总压分布曲线较为吻合,在保证精度的同时为了节省计算资源,后续选用 1 000 万的网格进行计算。

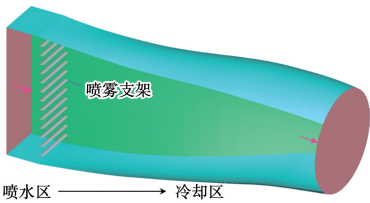


图 2 物理模型
Fig. 2 Physical model

2.2 边界条件

预冷段进口的气流给定为干空气,并设置入口条件为总温总压,壁面条件设置为绝热、无滑移,具体的边界条件如表 1 所示。

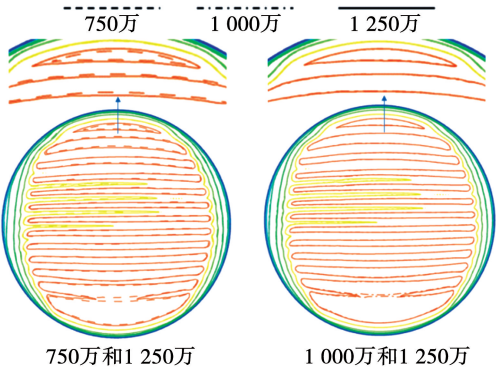


图 3 网格无关性验证
Fig. 3 Grid independence verification

表 1 边界条件

Tab. 1 Boundary condition

工况	入口总压/kPa	入口总温/K	来流马赫数	液气比/%
1	120.8	407.5	0.64	2.31
2	120.8	407.5	0.60	2.79
3	120.8	407.5	0.64	3.30

冷却介质选择质量分数分别为 10% ~ 50% 的乙醇和乙二醇溶液,初始温度为 18 ℃,喷雾半角为 40°。粒径参考表 2。

表 2 冷却介质粒径

Tab. 2 Cooling medium particle size

工 质	有机物质量分数/%	平均粒径/μm
乙醇 + 水	10	82.4
	20	76.5
	30	74.4
	40	66.4
	50	61.5
乙二醇 + 水	10	83.7
	20	82.4
	30	79.8
	40	74.0
	50	69.2

本文主要通过总温降和总温降系数以及总压降和总压损失系数对流场变化进行评估。

总压降:

$$\Delta p_t = p_{t,in} - p_{t,out} \tag{9}$$

总压损失系数:

$$C_{pt} = (p_{t,in} - p_{t,out})/p_{t,in} \tag{10}$$

总温降:

$$\Delta T_t = T_{t,in} - T_{t,out} \tag{11}$$

总温降系数:

$$C_{Tt} = (T_{t,in} - T_{t,out})/T_{t,in} \tag{12}$$

式中:下脚标 in 和 out—进气道的进口和出口; p_t —总压,Pa; T_t —总温,K。

2.3 数值验证

参照文献[22]的有机工质的喷射冷却试验,采用相同的数值方法对试验进行了数值仿真计算,结果如表 3 所示。由表 3 可知,对于有机混合工质数值计算的误差在 9% 以内,由此认为针对有机工质的数值计算模型和计算方法具有可行性和可靠性。

表 3 数值结果对比

Tab. 3 Comparison of numerical results

工质	有机物质量 分数/%	试验温降/℃	数值温降/℃	偏差/%
水	0	62.87	62.14	1.17
乙醇 + 水	10	59.08	63.52	6.98
	20	60.67	64.41	5.81
	30	61.37	65.75	6.66
	40	62.21	67.82	8.27
	50	63.29	67.39	6.09

3 结果与分析

3.1 有机工质质量分数对蒸发效果的影响

经计算得到不同质量分数的有机工质在各工况下的蒸发量如图 4 所示。其中,ET 表示乙醇与水混合的冷却工质,MEG 表示乙二醇与水混合的冷却工质。可以看到,在不同工况条件下,随着有机物质量分数的上升,冷却工质的蒸发量均持续升高,因此以有机工质与水作为冷却工质,能够改善冷却工质的蒸发性能,并且随着质量分数提高,改善效果愈发明显。通过两种有机工质蒸发量的对比发现,乙醇与水的混合工质较乙二醇与水混合工质的蒸发效果更佳,有效减少液态工质随气流进入压气机。

图 5 为不同质量分数不同工况下冷却工质的蒸发率。从图 5 可以看出,任何液气比条件下,随着有机物质量分数的升高,冷却介质的蒸发率均会提高,尤其是乙醇溶液,当质量分数由 10% 增加到 50% 时乙醇溶液的提升幅度接近 20%,乙二醇溶液蒸发率

的增幅略小,约为 10%。在质量分数保持不变的情况下,随着液气比的提升,有机混合工质的蒸发率会有所减弱。导致这种现象的原因是来流速度过高,有机混合工质在预冷段内的停留时间过短,而参与换热过程冷却工质的量加大,进而不能实现完全蒸发。

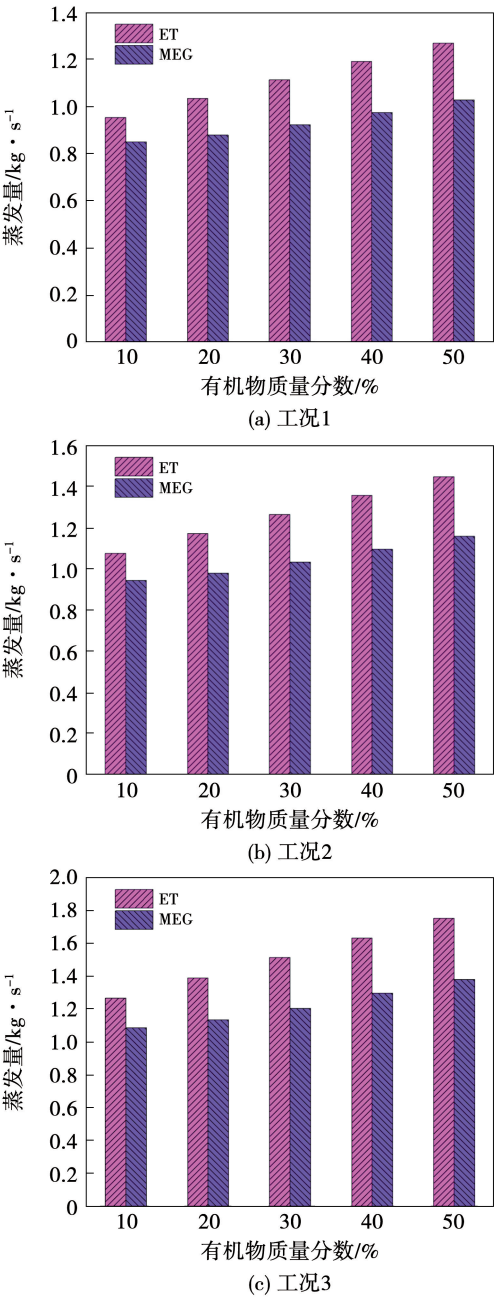


图 4 不同工况下工质的蒸发量随有机物质量分数的变化

Fig.4 Changes of evaporation rate of working medium with mass fraction of organic matter under different working conditions

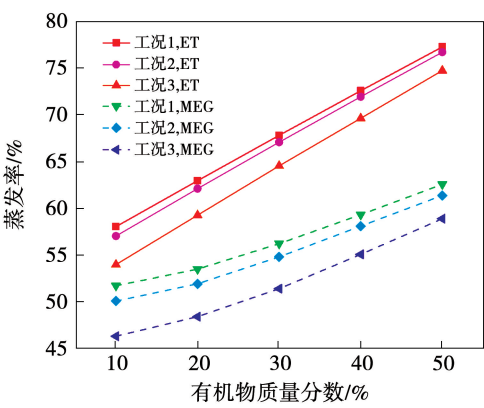


图 5 不同工况下工质蒸发率随有机物质量分数的变化

Fig.5 Change of evaporation rate of working medium with mass fraction of organic matter under different working conditions

3.2 有机工质质量分数对温降效果的影响

射流预冷的根本目的是降低高温进气温度,因此在预冷段由入口到出口建立不同的截面,通过每个截面上的平均温降系数来观察整个预冷段温度的变化情况。两种有机混合工质在不同液气比、不同质量分数下的总温降系数曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,相同质量分数的同一种工质在不同工况下的温降系数曲线的沿程变化趋势趋于一致。随着液气比的提高,有机混合工质对整个预冷段的降温效果都有所提升,出口温度也降得更低。以 50% 的乙醇溶液为参考,在工况 1 中,液气比仅为 2.31%,预冷段出口温降系数为 7.01%;在工况 2 中,液气比增至 2.79%,此时预冷段出口温降系数增加至 8.29%;在工况 3 中,液气比进一步提升,此时出口温降系数为 9.46%。在这 3 种工况下,虽然有机混合工质的蒸发率随着液气比的提高有所降低,但更多液态工质的进入,会进一步促进工质与气流的换热,提高蒸发量。从图 4 中的数据发现,随着预冷段中冷却工质蒸发量的提升,会在蒸发过程中持续吸收热量,使来流温度进一步下降。液气比对温降的作用不受工质种类和质量分数改变的影响。

在同一工况下,对于相同的有机混合工质,质量分数越小,预冷段出口处的温降效果会越显著。在工况 3 中,当高温进气的温度为 407.5 K、乙醇溶液的质量分数为 10% 时,预冷段出口的总温降系数达到了 10.24%;随着乙醇质量分数的提高,总温下降

的幅度减缓,当乙醇溶液的质量分数增加到 50% 时,出口处的总温降系数下降为 9.46%,较质量分数 10% 乙醇溶液总温降系数的变化约为 0.8%。同样,在工况 3 中,乙二醇的质量分数为 10% 时,出口处总温降系数为 9.22%,当质量分数为 50% 时,相较于 10% 的乙二醇溶液,温降系数降低了 0.85%。无论是乙醇或是乙二醇溶液,随着质量分数的增加,出口的温降效果都有所减弱。

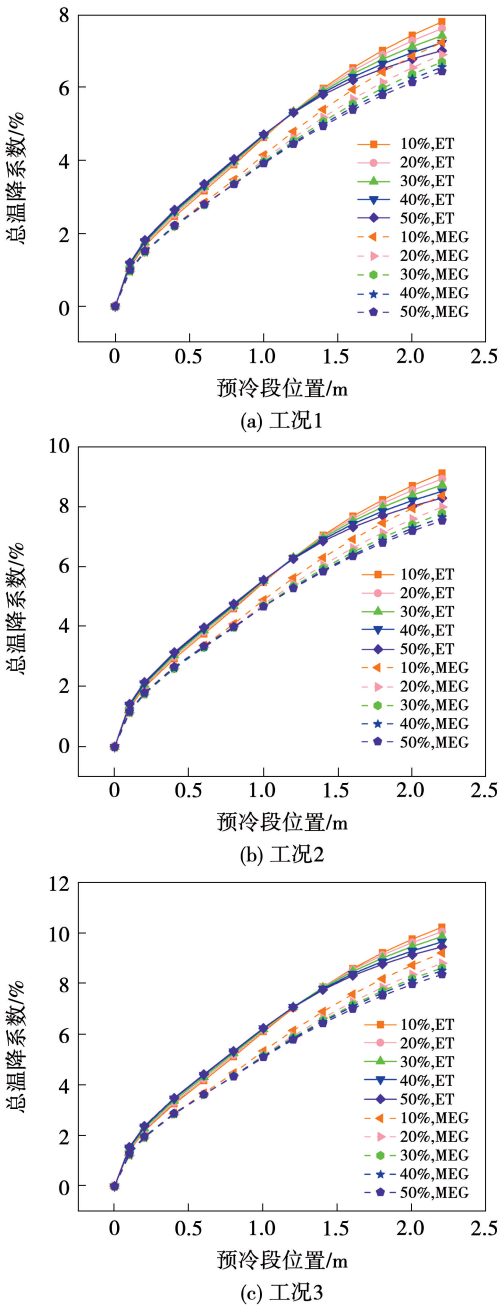


图 6 不同质量分数下的温降系数

Fig. 6 Temperature drop coefficients at different mass fractions

对于工况 2 和工况 3,有机工质质量分数的变化对出口处的温降效果具有同样的影响。造成上述现象的原因是有机物在发生相变时所需要的蒸发热和汽化潜热都远低于水,同等质量下,液态水能吸收更多的热量,质量分数越低的有机混合工质,对预冷段整体的温降效果越突出。但有机工质,尤其是乙醇,拥有易蒸发的特性,所以高质量分数的乙醇溶液在预冷段前段的温降效果要更显著;在相同质量分数和工况下,乙醇溶液的温降效果都要优于乙二醇溶液。

3.3 有机工质质量分数对压力损失的影响

预冷段中的压力损失主要包括喷雾装置引起的阻力损失、液滴与气流的碰撞损失和气流在预冷段中流动产生的损失,本文主要考虑前两种因素所造成的压力损失。为了深入探究不同质量分数的有机工质在不同液气比下对流场造成的压力损失的影响对预冷段中不同截面上的总压损失系数进行提取,对比结果如图 7 所示。

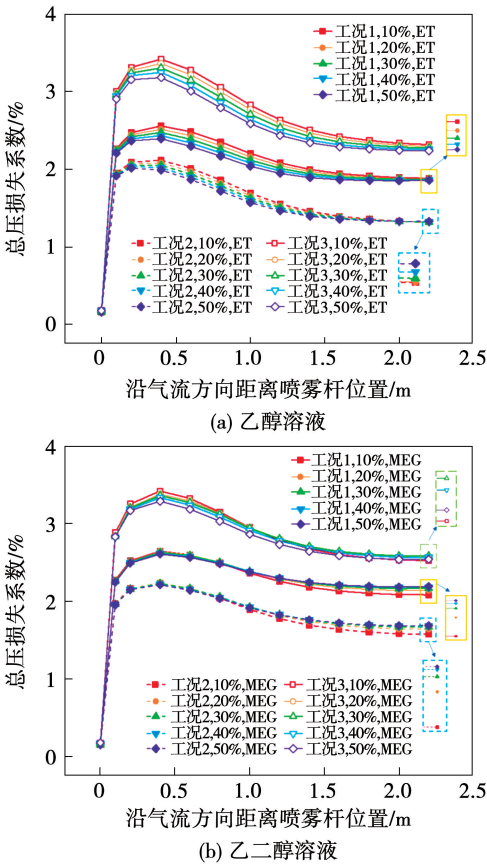


图 7 有机工质在预冷段内的总压损失系数对比

Fig. 7 Comparison of total pressure loss coefficients of organic working medium in precooling section

由图 7 可知,当高温气流流经喷雾装置后,总压损失系数会急剧上升,这主要是由喷雾装置对气流的扰动以及液滴喷射对气流形成的阻力所导致。高温气流经过喷雾装置之后,与液相冷却工质相互接触并发生双向耦合作用。随后液滴颗粒持续不断地吸收高温气流的热量,直到满足其汽化潜热值后,液滴颗粒由液相转变为气相,产生新的气体,并会对预冷段中的总压损失进行补偿,促使后段总压损失系数下降。但在接近出口处,大部分冷却工质完成了蒸发,而且出口附近温度已经大大降低,液滴颗粒对流场造成的总压损失与液滴颗粒蒸发所弥补的总压损失接近动态平衡,所以总压损失系数在出口附近几乎保持不变。

在预冷段的前半程,乙醇溶液质量分数越高,其所带来的压降损失越小。但是到了后半程,以低质量分数乙醇溶液作为冷却工质的压力损失系数的下降幅度要高于高质量分数乙醇溶液,最终在工况 1 和工况 3 中,50% 乙醇溶液对流场造成的压力损失最小,而在工况 2 中,10% 的乙醇溶液造成的压力损失最小。对于这一现象,主要从两个方面进行考虑,工况 1 和 3 的来流马赫数相同,主要是液气比的区别,但无论喷雾量的大小,50% 的乙醇溶液中乙醇含量更高,其蒸发效果更佳,液态颗粒的存留时间更短,造成的压力损失相对更小。工况 2 来流马赫数小于工况 1 和 3,颗粒与气流发生碰撞所引起的阻力损失相对更小,此时乙醇快速蒸发所带来的优势就会减少。同时流速减缓,液滴颗粒在预冷段停留的时间也相对更长,水滴可以蒸发得更完全。

有机工质作为冷却介质对流场造成的压力损失受有机工质的种类、质量分数、液气比以及来流马赫数多个因素的共同影响;乙醇溶液造成的压力损失小于乙二醇溶液,且预冷段的压力损失会随着有机溶液的质量分数和液气比的增加而降低。

经冷却之后,气体要继续进入压气机,出口流场的均匀度对压气机能否在额定工况下运行有着极大影响。因此针对不同质量分数有机工质在 3 种工况下出口流场均匀度进行分析,根据出口节点上所记录的各点总压进行标准差的求取,公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \frac{1}{N}} / \mu \tag{13}$$

式中: μ —出口截面上的平均压力,Pa; N —出口截面上的节点数量。

总压标准差可以反映出口总压的均匀度和波动性,该值越小,表明出口流场越均匀。将两种有机混合工质在各工况中出口位置的总压标准差进行计算,结果如表 4 所示。

表 4 出口总压标准差

Tab. 4 Standard deviation of total outlet pressure

工质	工况 1/%	工况 2/%	工况 3/%
10% ET	1.64	1.48	1.67
20% ET	1.62	1.47	1.65
30% ET	1.61	1.46	1.63
40% ET	1.59	1.45	1.62
50% ET	1.58	1.43	1.61
10% MEG	1.49	1.33	1.47
20% MEG	1.44	1.30	1.42
30% MEG	1.42	1.28	1.40
40% MEG	1.40	1.27	1.40
50% MEG	1.40	1.27	1.41

在不同工况条件下,影响出口均匀度的主要是来流马赫数、液气比、喷雾杆的扰动和工质的种类。工况 2 的来流速度最低,减少了喷雾装置处的流动损失,使出口流场均匀度更高。工况 1 与工况 3 相比,无论是乙醇或乙二醇溶液,两种工况的出口均匀度几乎相同,说明液气比对出口流场均匀度的影响比较小,同时流场均匀度随着有机工质质量分数的提高而增加。

4 结 论

以有机混合溶液(乙醇、乙二醇)作为冷却工质,在高温工况下,通过改变冷却液的质量分数和液气比进行喷雾冷却的数值模拟,得出如下结论:

- (1) 蒸发率和蒸发量都随着有机物质量分数的增加而提高,其中乙醇溶液更佳,质量分数为 50% 的乙醇溶液提升幅度达到 20%;液气比条件变化时不会对该规律造成影响。
- (2) 乙醇、乙二醇溶液的温降效果都会随着质量分数的提高而衰减,但乙醇溶液的冷却效果更佳;受益于快速蒸发的特性,质量分数越高的乙醇溶液

在前半程的温降效果越好。

(3) 流场的压力损失受来流马赫数和有机物质质量分数共同影响;在来流马赫数低的工况中,采用更高质量分数的有机溶液能够减少压力损失,提升出口均匀度。

参考文献:

[1] WANG Z, WANG Y, ZHANG J, 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.

[2] MEHTA U, BOWLES J, MELTON J, et al. Water injection pre-compressor cooling assist space access [J]. Aeronautical Journal, 2015, 119: 145 – 171.

[3] 王占学, 乔渭阳. 预冷却涡轮基组合循环发动机发展现状及应用前景[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2005, 18(1): 53 – 56.

WANG Zhanxue, QIAO Weiyang. An overview of development study and key technology of pre-cooled turbine based combined cycle engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2005, 18(1): 53 – 56.

[4] BURKARDT L A, NORRIS R. The design and evolution of the Beta two-stage-to-orbit horizontal take off and landing launch system [C]//USA, AIAA, 1992.

[5] BARTOLOTTA P A, MCENLIS N B, SHAFER D G. High speed turbines; Development of a turbine accelerator for space access [C]//USA, AIAA, 2003.

[6] BALEPIN V, CARTER P, SPATH T, et al. MIPCC technology development [C]//USA, AIAA, 2003.

[7] HENNBERRY H M, SNYDER C A. Analysis of gas turbine engines using water and oxygen injection to achieve high mach numbers and high thrust [R]. NASA TM-106270, Cleveland, NASA, 1993.

[8] CATER P, BALEPIN V. Mass injection and pre-compressor cooling engines analyses [C]//USA, AIAA, 2002.

[9] BALEPIN V, LISTON G. The steam jet; Mach 6 + turbine engine with inlet air conditioning [C]//USA, AIAA, 2001.

[10] ZHANG H, LUO M, PAN X, et al. Numerical analysis of gas turbine inlet fogging nozzle manifold resistance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A - Journal of Power and Energy, 2016, 230: 63 – 75.

[11] LIN A, ZHOU J, 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] RAHIM M A. Performance and sensitivity analysis of a combined cycle gas turbine power plant by various inlet air-cooling systems [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A - Journal of Power and Energy, 2012, 226: 922 – 931.

[13] YANG L, ZHOU J, FAN S, et al. Method and numerical simulation for evaluating the effects of water film on the performance of low-speed axial compressor [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 84: 306 – 317.

[14] LIN A, SUN Y, 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.

[15] LIN A, 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.

[16] LIN A, ZHENG Q, FAWZY H, 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.

[17] WULFF A, HOURMOUZIDIS J. Technology review of aeroengine pollutant emissions [J]. Aerospace Science and Technology, 1997, 8: 557 – 572.

[18] SUN L, ZHENG Q, LI Y, et al. Numerical simulation of a complete gas turbine engine with wet compression [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2013, 135: 012002.

[19] NOVELO D, IGIE U. Aero engine compressor cooling by water injection—Part 2: Performance and emission reductions [J]. Energy, 2018, 160: 1236 – 1243.

[20] ELWEKEEL F N M, ABDALA A M M. Effect of mist cooling technique on exergy and energy analysis of steam injected gas turbine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 298 – 309.

[21] 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.

[22] LU Yuming, FEI Hongzi, YANG Hao, et al. Effect of different cooling mediums on mass injection pre-compression cooling [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209: 118216.

(刘 颖 编辑)