文章编号:1674-7607(2026)10-0027-10 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250241

基于响应面法的混合工质跨声速叶栅气动性能优化

韩 旭[1], 施海波[2]
(1. 华北电力大学 河北省低碳高效发电技术重点实验室, 河北保定 071003
2. 华能江阴燃机热电有限公司, 江苏无锡 214000)

摘 要: 研究了 CO_2 质量分数、叶栅入口温度和出口背压对混合工质凝结流动特性和激波发展的影响。基于三因素三水平法构建了 17 组响应面,评估了各因素对叶栅平面熵产率积分值的影响。另外,基于响应面结果构建了二次回归函数,在预设参数约束条件下对熵产率积分值实施极小化寻优,确定出最优参数组合。结果表明:CO_2 质量分数由 13.45%增至 23.45%时,尾缘斜激波增强,内、外尾激波夹角从 136°缩小至 125°;入口温度超过 374.3 K 后,场内激波得到增强,成核区集中于叶片尾缘附近;当出口背压升高,叶栅通道内激波强度大幅降低,内、外尾缘激波上移且夹角增大;出口背压对熵产率起主导作用,CO_2 质量分数与入口温度的作用程度较弱。

关键词: H_2O/CO_2 混合工质; 非平衡凝结; 激波效应; 损失评估
中图分类号: TK26 **文献标志码:** A **学科分类号:** 470.10

Aerodynamic Performance Optimization of Mixed-working-fluid Transonic Cascade Based on Response Surface Methodology

HAN Xu[1], *SHI Haibo*[2]
(1. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;
2. Huaneng Jiangyin Gas Turbine Cogeneration Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu Province, China)

Abstract: The effects of CO_2 mass fraction, cascade inlet temperature, and outlet back pressure on the condensing flow characteristics and shock wave development of a mixed-working-fluid transonic cascade were investigated. 17 sets response surface design based on a three-factor, three-level approach was constructed to evaluate the influence of each factor on the integrated entropy production rate over the cascade plane. A quadratic regression function was then developed based on the response surface results. Minimization of the entropy production rate was performed under prescribed parameter constraints to determine the optimal parameter combination. Results show that when the CO_2 mass fraction increases from 13.45% to 23.45%, the trailing-edge oblique shock strengthens, and the angle between the inner and outer trailing shocks decreases from 136° to 125°. When the inlet temperature exceeds 374.3 K, the shock waves within the flow field intensify, and the nucleation zone concentrates near the blade trailing edge. Increasing the outlet back pressure substantially reduces shock intensity in the cascade passage, shifts the inner and outer

收稿日期: 2025-04-27 **修订日期:** 2025-05-23
基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2026502012,E2023502025);河北省高等学校科学研究项目青年拔尖资助项目(BJ2025053);中央高校基本科研业务费资助项目(2024MS145)
作者简介: 韩 旭(1991—),男,河北保定人,副教授,博士,主要研究方向为动力机械内流,E-mail: xuhan@ncepu.edu.cn。

trailing shocks upward, and enlarges their included angle. The outlet back pressure plays a dominant role in entropy production, while the CO_2 mass fraction and inlet temperature have weaker effects.

Key words: H_2O/CO_2 mixed working fluid; non-equilibrium condensation; shock wave effect; loss evaluation

超临界水气化制氢循环发电系统(SCWG-H_2-CCS)利用超临界水环境使煤炭发生一系列化学反应,生成 H_2 以及 CO,随后超临界 H_2O、CO、H_2 等混合气体进入氧化反应器,生成的超临界 H_2O、CO_2 混合气经过分离净化后进入混合工质透平做功。CO_2 的存在使得混合气整体物性发生变化,透平末级低压区的凝结流动发生变化,此时激波耦合作用更加复杂,由此带来了流动损失。国内外对于透平内单组分 H_2O 凝结流动已经开展了广泛研究,Moses 等[1]在一系列 Laval 喷管内非平衡凝结实验中进行静压和光散射测量,揭示了超声速流动中液滴生长机理。Bakhtar 等[2]发现液滴凝结对叶片吸力侧压力有显著影响,并获得了二维叶栅表面压力分布实验数据。Dykas 等[3]对 200 MW 透平低压级叶栅内的湿蒸汽凝结流动开展了实验研究,用静压测量与纹影照相法追踪到了叶栅内激波现象。Shabani 等[4]预测了在叶栅中水滴凝结的分布,并提出量化方程进行损失评估,结果显示静叶栅内损失占总损失的 10%。

在多组分混合工质流动方面,Bian 等[5]在改型 Laval 喷管内开展了不同组分浓度 CH_4-CO_2 混合工质的凝结特性分析,验证了利用超音速分离器去除天然气中 CO_2 的可行性。曹挺等[6]对 He-N_2 混合工质布雷顿循环系统的热力性能进行了研究,分析了不同组分配比下混合工质的物性变化规律。林智博等[7]对超临界 CO_2/R41 混合工质的传热特性进行了研究,发现 R41 的加入提高了工质整体的传热系数。Zhang 等[8]设计了超临界混合工质流动传热实验系统,对超临界 H_2O/CO_2 混合工质的传热特性进行了研究,分析了不同工况下混合工质传热机理及摩擦因子曲线的形成机理。刘晓薇[9]对 H_2O/CO_2 混合气体的凝结流动特性进行了研究,发现 CO_2 的组分浓度和叶栅排汽压力对混合工质做功能力有显著影响。

当前,针对多组分凝结流动问题,国内外学者已开展广泛研究,但超临界水气化制氢循环发电系统中 H_2O/CO_2 混合气体的凝结流动研究仍存在显著局限性。现有研究多聚焦于凝结现象的热力学特性演变,而针对激波效应及其损失机制的量化分析仍显不足。本文以 200 MW 低压透平末级为研究对象,系统探究了混合工质中 CO_2 质量分数、入口温度及背压对流场激波结构的动态作用机制,并进一步建立响应面模型,以量化关键参数与截面熵产率的关联式。本研究可为超临界循环发电系统中混合工质透平损失控制提供理论支撑与工程实践指导。

1 数值模型

1.1 混合相流动方程

多组分混合物的物理属性由单组分气体种类、温度、压强及组分比等参数确定。为简化模型,忽略各组分之间的相互影响,通过近似平均规则由各组分气体的物性与组分比直接确定混合气体的物性参数。混合气体中可凝组分自发凝结会产生液相,气液混合相的热物性参数采用质量加权平均值和体积加权平均值给出。

$$\chi_m=\varphi\chi_1+(1-\varphi)\chi_2 \tag{1}$$

$$\zeta_m=w\zeta_1+(1-w)\zeta_2 \tag{2}$$

式中:χ_m 为体积加权量;χ_1 为液相的物性参数;χ_2 为气相的物性参数;ζ_m 为质量加权量;ζ_1 为液相物性参数;ζ_2 为气相的物性参数;φ 为混合相中液相的体积分数;w 为混合相中液相的的质量分数。

H_2O/CO_2 混合气体流动属于多相多组分流动,其混合性质可以直接由各组分的性质及其组分比确定。忽略相间的速度滑移,得到混合工质两相流动控制方程。

$$\frac{\partial\rho_m}{\partial t}+\nabla(\rho_m\boldsymbol{v}_m)=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\boldsymbol{v}_m)+\nabla\cdot(\rho_m\boldsymbol{v}_m\boldsymbol{v}_m)=-\nabla\cdot p+\nabla\cdot[\mu_m(\nabla\boldsymbol{v}_m+\nabla\boldsymbol{v}_m^{\mathrm{T}})]+\rho_m\boldsymbol{g}+\boldsymbol{F} \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\sum_{k=1}^{n}(\varphi_k\rho_kE_k)+\nabla\cdot\sum_{k=1}^{n}[\varphi_k\boldsymbol{v}_k(\rho_kE_k+p)]=\nabla\cdot(k_{\mathrm{eff}}\nabla T)+S_E \tag{5}$$

式中:ρ_m 为混合相密度,kg/m^3;$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度矢量,m/s^2;$\boldsymbol{v}_m$ 为混合相平均速度矢量,m/s;μ_m 为混合相黏度,N·s/m^2;$\boldsymbol{F}$ 为体积力,N;n 为相态数量,

取 2；φ_k 为 k 相的体积分数；k_{eff} 为有效导热系数，W/(m·K)；ρ_k 为第 k 相的单相密度，kg/m³；E_k 为第 k 相单位质量总内能，J/kg；S_E 为能量源相；t 为时间，s；T 为温度，K；p 为压力，Pa。

1.2　液相控制方程

在多组份流体输运方程的基础上，本研究基于 Euler / Euler 方法建立流动模型，每个流动变量均有各自的守恒型控制方程，主要包括气液混合相控制方程以及液相控制方程。质量、动量、能量守恒方程是基于气液混合相建立的。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j}(\rho \boldsymbol{u}_j)=-\Gamma \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{u}_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j}(\rho \boldsymbol{u}_i \boldsymbol{u}_j)=-\frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{x}_i}+\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j}\left[\mu\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}_j}{\partial \boldsymbol{x}_i}+\frac{\partial \boldsymbol{u}_i}{\partial \boldsymbol{x}_j}-\frac{2}{3}(\delta_k)_{ij}\frac{\partial \boldsymbol{u}_j}{\partial \boldsymbol{x}_j}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j}(-\rho\overline{\boldsymbol{u}_{i'}\boldsymbol{u}_{j'}})-\Gamma \boldsymbol{u} \tag{7}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_i}[\boldsymbol{u}_i(\rho E+p)]=\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}_j}\left[\lambda_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{x}_j}+\boldsymbol{u}_i(\boldsymbol{\tau}_{ij})_{\text{eff}}\right]-\Gamma(h-h_{\text{lv}}) \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，m/s；μ 为动力黏度，N·s/m²；ρ 为两相混合流体密度，kg/m³；Γ 为单位体积混合相内的液相质量生成率，kg/(m³·s)；$\boldsymbol{x}_i$、$\boldsymbol{x}_j$ 为坐标系坐标分量；$\boldsymbol{u}_i$、$\boldsymbol{u}_j$ 为速度张量；$\boldsymbol{u}_{i'}$、$\boldsymbol{u}_{j'}$ 为脉动速度分量；E 为单位质量流体的总能量，J/kg；λ_{eff} 为有效导热系数，W/(m·K)；$(\boldsymbol{\tau}_{ij})_{\text{eff}}$ 为有效应力张量；δ_k 为 Kronecker delta 数；h 为液相比焓，J/kg；h_{lv} 为凝结潜热，J/kg。

1.3　湿蒸汽凝结成核及液滴生长模型

由于 200 MW 透平末级所处的环境（$p<100$ kPa，$T<400$ K）远未达到 CO_2 的饱和点，因此本研究所涉及到的 H_2O/CO_2 混合工质非平衡凝结流动中 CO_2 可以当成不凝气体处理。此外，水以细小液滴的形式存在，这种条件下 CO_2 溶解量有限，因此忽略其与液态水之间的反应。H_2O/CO_2 混合工质的饱和温度为当地水蒸气分压下水的饱和温度。使用经典成核理论计算混合工质成核率时会导致计算结果的不连续，因此采用内部一致性成核理论（ICCT）。

$$J_{\text{ICCT}}=\varepsilon\frac{1}{S}\sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}}\frac{\rho_{\text{v}}^2}{\rho_{\text{l}}}\exp\left(-\frac{4\pi r_{\text{c}}^2\sigma}{3k_{\text{b}}T_{\text{v}}}\right)\exp(\theta) \tag{9}$$

式中：J_{ICCT} 为成核率，m⁻³·s⁻¹；ε 为修正系数，取 0.01；S 混合气体过饱和度；m 为单分子水蒸气分子质量，kg；ρ_{l} 为液相水密度，kg/m³；ρ_{v} 为气相水密度，kg/m³；r_{c} 为液滴临界半径，m；σ 为水滴表面张力，N/m；k_{b} 为玻尔兹曼常数；θ 为无量纲表面张力；T_{v} 为气相温度，K。

水滴生长模型为

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial t}=\frac{\lambda_{\text{v}}(T_{\text{sat}}-T_{\text{v}})}{\rho_{\text{l}}h_{\text{lv}}\bar{r}\left[\frac{1}{1+4Kn}+3.78(1-\upsilon)\frac{Kn}{Pr}\right]} \tag{10}$$

式中：$\bar{r}$ 为平均水滴半径，m；λ_{v} 为气相热导率，W/(m·K)；Kn 为 Knudsen 数；Pr 为 Prandtl 数；T_{sat} 为水的饱和温度，K；υ 为无量纲修正参数。

1.4　数值计算方法

在无滑移假设下，构建了超声速非平衡凝结两相流动数值模型，如图 1 所示。模型整体采用双流体模型求解瞬时流场参数，气液混合相基于无滑移假设为液相模块提供同步速度场；液相状态模块继承混合相速度场后，通过群体平衡方程计算液滴数密度、Sauter 平均半径及液相质量分数等；成核与生长模块在接收液相状态参数后，耦合经典成核理论与液滴生长动力学模型，计算质量凝结速率和相变潜热释放量；源项耦合机制将相变源项反馈至气液混合相模块的守恒方程，同时更新成核率与液滴生长速率至液相模块，形成闭环迭代计算框架。

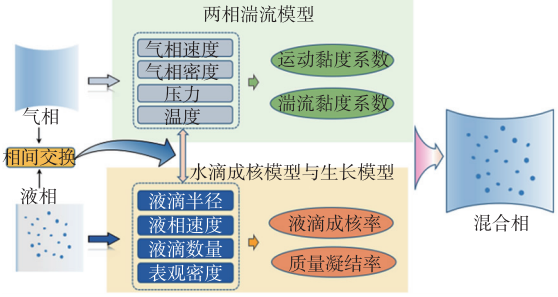


图 1　无滑移假设下的凝结流动模型

Fig. 1　Condensing flow model under no-slip assumption

2　模型验证

在超临界水气化制氢系统的工程实践场景中，H_2O/CO_2 混合工质处于相对低压与低温的条件下，此环境使得 CO_2 处于非凝结态。在该特定热力学区间范围内，N_2 与 CO_2 作为不可凝结组分，其物性参数表现出高度相似性。基于此，可借助广义质量加权模型对 H_2O/CO_2 混合工质的热力学特性进行预测分析。选取 N_2/H_2O 凝结流动实验数据[10]，将所构建的混合气体多组分凝结模型在 Wyslouzil 喷管模型上进行系统验证，以保障模型的有效性与可靠性，喷管具体尺寸如表 1 所示。

表 1 Wyslouzil 实验喷管尺寸

Tab. 1 Geometric dimensions of Wyslouzil nozzle

收缩段长度/mm	拓展段长度/mm	收缩比	喉部宽度/mm	喉部高度/mm
38	95	1.58	5	12.7

图 2 为 Wyslouzil 喷管几何模型[10]。其中，x、y 为喷管的尺寸坐标。如图 2 所示，H_2O/N_2 混合气体入口总压为 60 kPa，其中水蒸气分压为 1 kPa，入口总温为 286.7 K。图 3 展示了喷管轴向的压力分布云图。沿着轴线方向，压力逐步下降，在 Wilson 点处出现非平衡凝结现象，混合工质中的水蒸气开始凝结成水滴，在局部区域释放出汽化潜热，造成压力突跃。模拟的压力分布与实验数据趋势一致，压力误差发生在凝结段之后。综上可以说明该双组分凝结模型可以模拟出工质膨胀的完整过程。

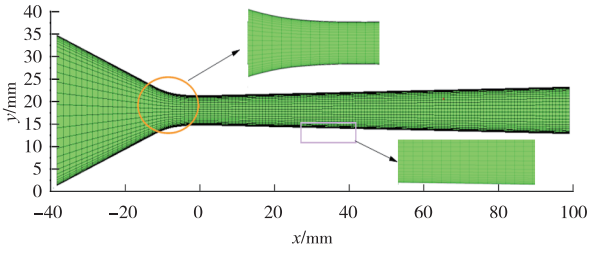


图 2 Wyslouzil 喷管几何模型

Fig. 2 Geometric model of Wyslouzil nozzle

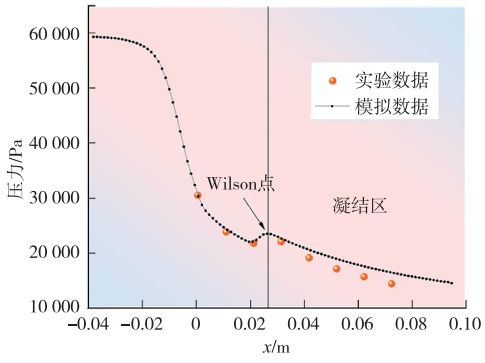


图 3 实验数据验证

Fig. 3 Validation with experimental data

基于 200 MW 透平末级静叶栅[3]，开展 H_2O/CO_2 混合工质凝结流动数值研究，叶栅几何构型如图 4 所示。采用 ANSYS ICEM 进行三维结构化网格划分，壁面设置为无滑移绝热边界条件，进/出口采用总压-静压边界条件组合。为验证数值模型的网格独立性，基于实验基准工况，进口总压 $p_0=89$ kPa、进口总温 $T_0=374.3$ K，系统论证网格量级对叶片表面压力分布的影响，结果如图 5 所示。叶片吸力面压力参数趋于稳定，不同尺寸网格结果差异主要出现在叶片吸力面凝结发生位置，以及靠近叶片后缘的位置。造成这种现象的原因可能是凝结和尾缘波系的影响，导致了实验测量的误差。当网格量超过 60 万时，凝结位置压力梯度变化率收敛于 0.3%的阈值，此时流场解已达到网格无关状态。综合考虑计算精度与资源效率，选定 60 万网格进行研究。

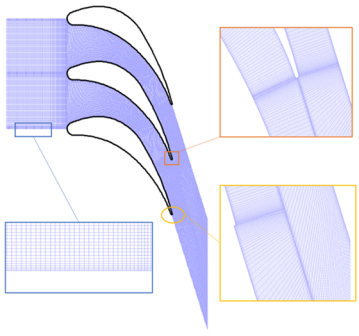


图 4 叶型计算网格

Fig. 4 Computational grid of cascade

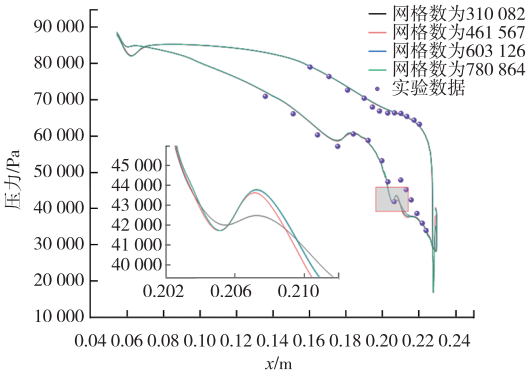


图 5 网格无关性验证

Fig. 5 Grid independence verification

3 结果分析

3.1 入口 CO_2 质量分数对流场特性的影响

本研究基于水煤气发电系统[9]中工质掺混参数（H_2O 与 CO_2 质量分数分别为 81.55%和 18.45%），结合实际工程应用中煤种差异导致气化产物波动的特征，重点考虑透平入口 CO_2 质量分数变化对流动特性的影响规律。在进口压力为 89 kPa、温度为 374.3 K 的边界条件下，设置 CO_2 质量分数分别为 13.45%、18.45%和 23.45%，以解析混合工质体系中非平衡凝结相变与激波耦合作用的动态演化机制。

过冷度作为凝结相变的核心参数，其数值大小直接决定水蒸气成核与液滴生长行为。当工质温度高于饱和温度时，系统处于热力学平衡态，此时相变驱动力不足，导致凝结液滴难以形成。当过冷度达到临界阈值时，吉布斯自由能变化突破成核能垒，引

发 H_2O 非平衡凝结成核。凝结过程中，H_2O 释放出气化潜热导致局部压力脉动，引起显著的热力学损失。图 6 揭示了叶栅流场过冷度分布的空间演化规律，在低 CO_2 质量分数（13.45%）下，过冷区域主要集中于流道中轴区与吸力面近壁处边界层。随着 CO_2 质量分数增至 23.45%，叶片吸力面边界层过冷核心区沿流道中心扩展，而中轴低温区逐步向下游移动。混合工质中 CO_2 质量分数的增加使热力学势场重构，促使成核起始位置产生空间变化。

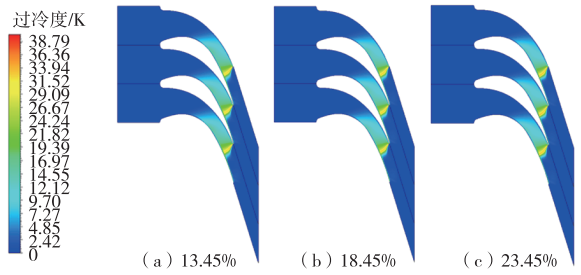


图 6　不同 CO_2 质量分数下叶栅过冷度云图

Fig. 6　Contours of subcooling degree at different CO_2 mass fractions

图 7 展示了叶栅中心流线上湿度分布与液滴半径增长率的变化规律，不同 CO_2 质量分数下混合工质在跨音速流动中呈现相似的相变动力学特征。液滴半径增长率在 $x=0.21$ m 处达到峰值，触发快速凝结，导致下游 $x=0.22$ m 处液相湿度呈非线性增长。随着混合工质中 CO_2 质量分数从 13.45%提升至 23.45%，凝结过程产生系统性抑制，液滴半径起始增长点向叶栅出口方向迁移，最大液滴增长率降低，叶栅出口湿度从 4.47%降低到 3.98%。

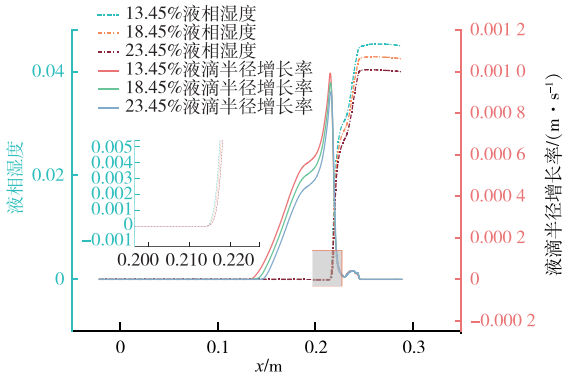


图 7　流道湿度与液滴半径增长率

Fig. 7　Streamwise humidity and droplet radius growth rate

在叶栅通道内，混合工质超音速流动会诱发剧烈的气动激波现象，H_2O 凝结产生的压力脉动会对气动激波产生干涉，带来复杂的激波损失。通过分析叶栅平面的马赫数场与密度梯度场，可精准追踪激波演化过程。图 8 为不同 CO_2 质量分数工况下流场模拟结果，混合工质超音速来流在叶栅尾缘处形成具有双波结构的斜激波系统，该激波系统包含内、外尾缘激波 2 类典型结构，内尾激波前后分别产生了强烈的压缩波和膨胀波。

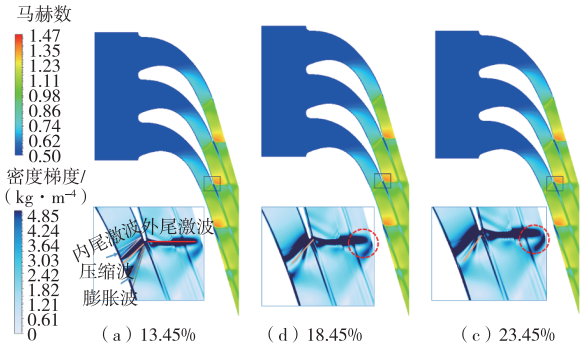


图 8　3 种工况下马赫数场和密度梯度场

Fig. 8　Mach number and density schlieren phot under three operating conditions

随着混合工质中 CO_2 质量分数的增加，水蒸气分压力呈递减趋势，H_2O 组分凝结相变过程受到显著抑制，其诱发的流场压力脉动相应衰减。凝结释放潜热产生的凝结压力激波与超音速流动气动激波的干涉作用减弱，促使内尾缘激波前压缩过程得到强化。结合图 8 中密度梯度云图可见，激波系强度随 CO_2 质量分数提升呈单调递增特性。当 CO_2 质量分数由 13.45%提升至 23.45%时，内尾缘激波在流道中的延伸距离增加，激波锋面前的压缩波作用程度增加，使得马赫数有所升高，锋面后方的膨胀波效应有所减弱。同时，内尾缘激波末端位置点逐步后移，而外尾缘激波空间位置基本保持稳定，内、外尾缘激波夹角从 136°缩小至 125°。深入分析物性参数发现，CO_2 的掺入使得混合工质比热比降低，低比热比引发的受限膨胀使得局部马赫数增大，激波效应增强。

在激波锋面区域，流体经历非连续压缩过程，压力跃迁幅值可精确表征激波强度。图 9 为叶片表面及中心流线压力分布曲线，在 $x=0.215$ m 处的叶片吸力面位置可观测到压力突变，该现象对应于内尾缘激波与叶片表面的相互作用。当混合工质中 CO_2 质量分数由 13.45%增至 23.45%时，内尾缘激波作用点沿吸力面向叶栅出口方向迁移，导致内/外尾缘激波夹角缩减约 8.08%。进一步对中心流线压力数据进行分析，发现叶栅出口区域呈现双压力跃迁峰，随着 CO_2 质量分数增加，流场激波效应增强，双压力突跃峰强度均有所上升，其形成机制源于外尾缘激波向上级叶片流道的拓展。

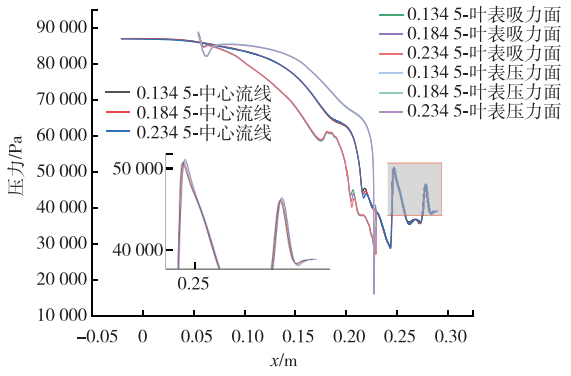


图 9 叶片表面压力和流道中心线压力分布

Fig. 9 Distribution of blade surface pressure and centerline pressure

3.2 入口温度对激波效应的影响

为定量揭示入口温度对非平衡相变过程及激波动力学特性的影响机制，选取 CO_2 质量分数为 18.45%的 H_2O/CO_2 混合工质作为实验工质，在恒定入口压力(89 kPa)与出口背压(39 kPa)条件下，设计 359.3、374.3 及 389.3 K 3 组入口温度工况开展对比实验。

如图 10 所示，不同入口温度条件下成核区演化呈现显著差异，当 T_{in}=359.3 K 时，工质初始热力学过冷度较高，使得膨胀流动早期即满足成核临界条件，成核起始位置位于叶片吸力面，且成核活跃区贯穿主流道至叶栅尾缘。当 T_{in} 升高至 374.3 K，初始饱和度提升导致需经充分膨胀至尾缘附近方满足相变条件，成核区显著后移并呈现扇形分布特征。当 T_{in} 进一步升至 389.3 K，尽管成核起始位置基本稳定，但有效成核区范围因相变驱动力衰减而略微缩减。综上所述，混合工质入口温度对非平衡凝结液滴成核位置有重要影响，凝结位置的变化也将使得凝结激波特性产生非线性演化。

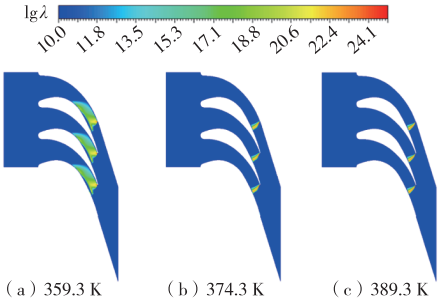


图 10 叶栅通道成核率 λ 云图

Fig. 10 Nucleation rate contours in cascade channel

当混合工质在叶栅通道内达到临界过冷度时，水蒸气触发成核过程，凝结核心在成核率峰值区域经历指数增长后形成液态水滴。叶栅通道内湿度分布如图 11 所示，当进口温度 T_{in}=359.3 K 时，叶栅通道内液相质量分数最先在叶片吸力面区域生成，沿流动方向湿度渐增至 5.1%并保持至出口。当进口温度升至 374.3 K 时，成核区迁移至尾缘流道，吸力面的起始湿度区消失，通道内最大湿度进一步降低至 4.3%。当叶栅进口温度进一步升高至 389.3 K 时，尽管成核区空间位置未发生显著迁移，但工质饱和度的热力学状态升高导致相变驱动力衰减，通道内最大液相质量分数仅达 3.6%。值得注意的是，389.3 K 工况下尾流区湍流耗散加剧，促使已生成液滴在出口段发生二次蒸发现象，最终叶栅出口液相质量分数降至 2.5%。

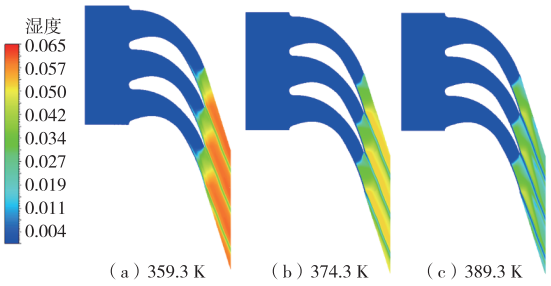


图 11 叶栅通道湿度云图

Fig. 11 Humidity contours in the cascade channel

混合工质中 H_2O 组分的非平衡相变过程伴随潜热释放，形成具有强间断特性的凝结激波，入口温度作为关键边界条件，通过改变工质热力学状态直接影响凝结激波的生成阈值与作用强度，进而重塑激波系统的能量分配机制。图 12 揭示了不同入口温度条件下的激波干涉模态演化。在 T_{in}=359.3 K 工况下，叶片吸力面附近形成高浓度凝结区，其潜热释放诱发强压力脉动。生成的凝结激波在吸力面边界层处形成强烈的压缩作用，产生的局部高密度梯度区域直接阻断从尾缘向吸力面发展的内尾激波系。当 T_{in}=374.3 K 时，相变驱动力衰减使凝结区后移至尾缘区域，此时内尾激波突破凝结激波封锁，其结构完整延伸至吸力面边界层。当 T_{in}=389.3 K 时，热力学饱和度升高使得凝结激波减弱，

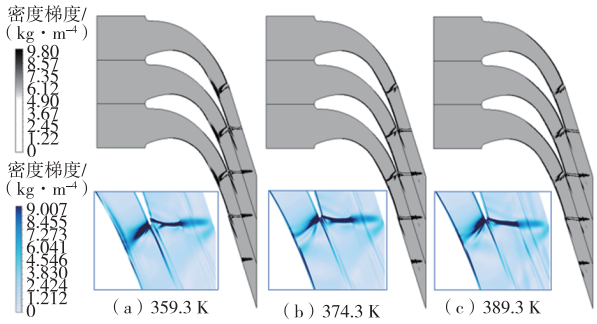


图 12 不同入口温度下叶栅密度纹影图

Fig. 12 Density shadow images at different inlet temperatures

凝结激波对超声速气动激波干涉作用进一步弱化，波系在干涉界面发生反射叠加。

3.3　不同背压对激波效应的影响

为研究 H_2O/CO_2 混合工质凝结流动中激波耦合机制，采用背压调控以控制叶栅内膨胀过程，获得耦合激波演化规律。选取典型组分工况（CO_2 质量分数＝18.45%），设定基准进口参数（p_{in}＝89 kPa，T_{in}＝374.3K），出口背压分别取 49、39 和 29 kPa，研究激波空间位置与压力参数的关联模型。

如图 13 所示，不同背压工况下流场参数分布呈现显著差异，当背压为 29 kPa 时，叶栅尾缘附近形成具有双波结构的斜激波系；随着背压增至 49 kPa，通道内膨胀效应衰减导致激波强度降低，同时内/外尾缘激波向上游迁移且两者间夹角由 38°扩大至 54°。该现象揭示了背压升高后通过抑制膨胀过程引发激波系统重构的物理机制。

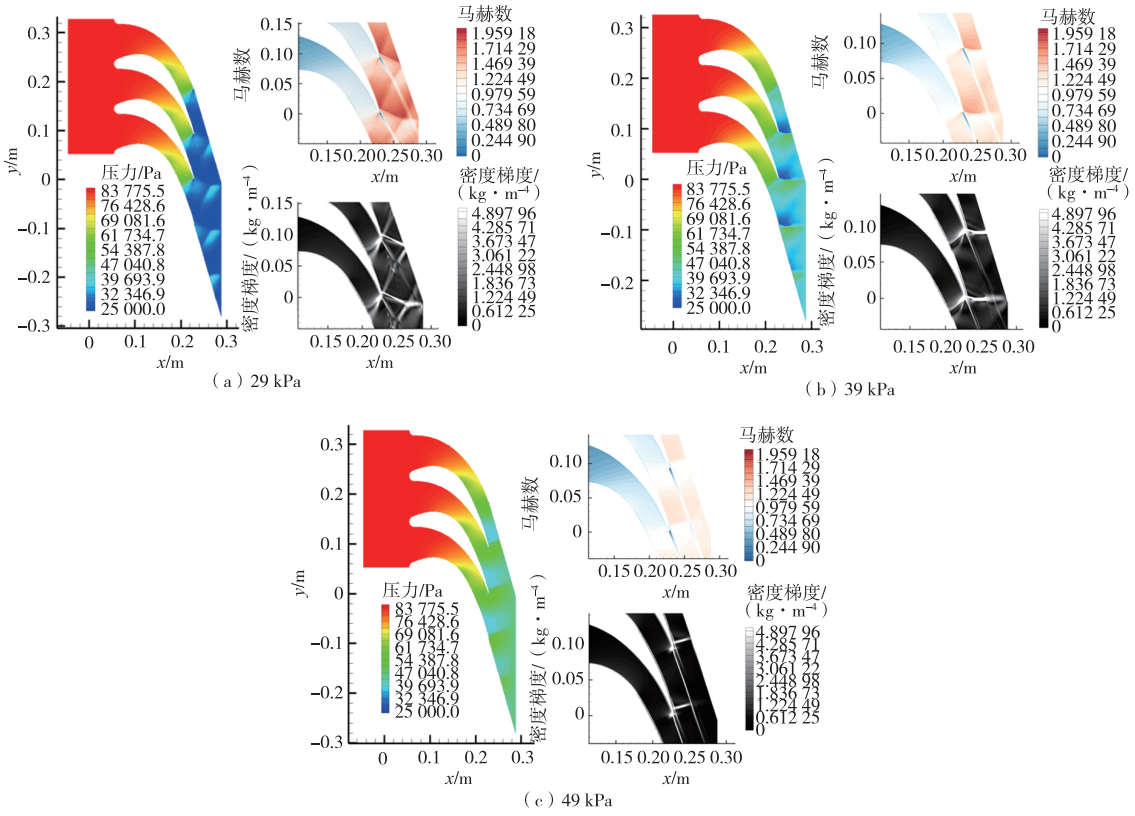


图 13　不同背压下流场参数云图

Fig. 13　Flow field contours at different back pressures

图 14 展示了不同背压工况下叶栅流道中心线压力分布特征。在 29 kPa 背压条件下，流场激波效应显著，x＝0.23 m 处受内尾缘激波前驱压缩波影响，局部压力跃升；在 x＝0.25～0.26 m，受下游第一级叶片外尾缘激波及其反射激波的双重作用，压力曲线发生 2 次阶梯式突跃；至x＝0.28 m 处，第二级下游叶片外尾缘激波引发高强度压力突跃。随着背压升高至 39 kPa，激波系统发生重构，内尾缘激波作用点前移至 x＝0.22 m，下游第一级外尾缘激波反射现象消失，仅在 x＝0.25 m 处保留单次突跃，第二级外尾缘激波影响强度衰减。当背压增至 49 kPa 时，内尾缘激波被限制在尾缘区域，外尾缘激波继续向上游迁移并伴随强度衰减，此时流道压力分布呈现弱激波特征。

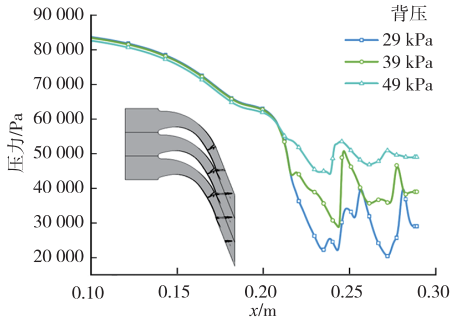


图 14　流道中心线上的压力分布

Fig. 14　Pressure distribution along streamline centerline

4　响应面分析

混合工质在叶栅通道内非平衡凝结流动过程中，由凝结相变与激波效应引发显著热力学不可逆

耗散，会诱发局部流动分离损失。为量化关键参数对流动损失的影响，本研究选取叶栅出口背压(A)、CO_2 质量分数(B)及进口温度(C)作为控制变量，基于响应面法构建了叶栅平面熵产率积分值的多因素耦合分析模型，其包含 17 组实验点的中心复合设计矩阵，如表 2 所示。

表 2 RSM 响应面实验结果

Tab. 2 RSM experimental results

序号	背压/kPa	CO_2 质量分数	入口温度/K	平面熵产率积分/(W·m^{-1}·K^{-1})
1	29	0.134 5	374.3	6.599 81
2	49	0.134 5	374.3	3.021 51
3	29	0.234 5	374.3	7.312 17
4	49	0.234 5	374.3	2.987 45
5	29	0.184 5	359.3	5.863 51
6	49	0.184 5	359.3	3.182 51
7	29	0.184 5	389.3	7.682 58
8	49	0.184 5	389.3	3.694 23
9	39	0.134 5	359.3	5.032 35
10	39	0.234 5	359.3	4.888 31
11	39	0.134 5	389.3	5.628 79
12	39	0.234 5	389.3	5.633 44
13	39	0.184 5	374.3	5.177 17
14	39	0.184 5	374.3	5.177 17
15	39	0.184 5	374.3	5.177 17
16	39	0.184 5	374.3	5.177 17
17	39	0.184 5	374.3	5.177 17

4.1 模型误差分析

表 3 给出了基于中心复合设计的二阶响应面模型方差分析结果。模型项呈现高度统计显著性(显著性概率 $P<0.000\ 1$)，表明该模型能有效解释熵产率的变化。F 统计量(F)是响应面法方差分析的核心检验指标，可用来判断某一项因素或交互项对响应值的影响是否显著。由表 3 可知，线性项中出口背压对熵产率空间积分值的主导效应最显著($F=437$)，AC 交互项表现出显著的协同作用($F=7.04$)，其物理机制可归因于，出口背压通过调整膨胀过程导致激波强度变化，进口温度降低可改变混合工质的非平衡凝结强度，从而强化激波效应，二者的热力学-激波耦合效应共同驱动熵产率非线性增长。

表 3 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
回归模型	28.84	6	4.81	79.21	0.000 1	显著
A	26.54	1	26.54	437.46	0.000 1	
B	0.036 3	1	0.036 3	0.598 3	0.457 1	
C	1.69	1	1.69	27.78	0.000 4	
交互项 AB	0.139 3	1	0.139 3	2.3	0.160 7	
交互项 AC	0.427 3	1	0.427 3	7.04	0.024 2	
交互项 BC	0.005 5	1	0.005 5	0.091 1	0.769 0	
残差	0.606 8	10	0.060 7			

4.2 响应面结果分析

图 15 揭示了出口背压、CO_2 质量分数与进口温度三者的交互作用机制。如图 15(a)和图 15(b)所示，熵产率平面积分值随背压降低而大幅增长，且在低背压区间(29～39 kPa)对 CO_2 质量分数敏感性显著增强。该现象主要归因于双重热力学效应，背压降低加剧了叶栅通道的膨胀过程，CO_2 质量分数增加导致混合工质比热比降低，促使局部流速增大，进一步强化了激波损失。图 15(c)和图 15(d)表明，在恒定背压工况下，熵产率积分值对进口温度呈正响应特性。这是由于温度升高使凝结效应减弱，凝结激波对超声速气动激波的干涉大幅度衰减，使得场内激波效应显著增强，激波峰面附近耗散损失随之增大。

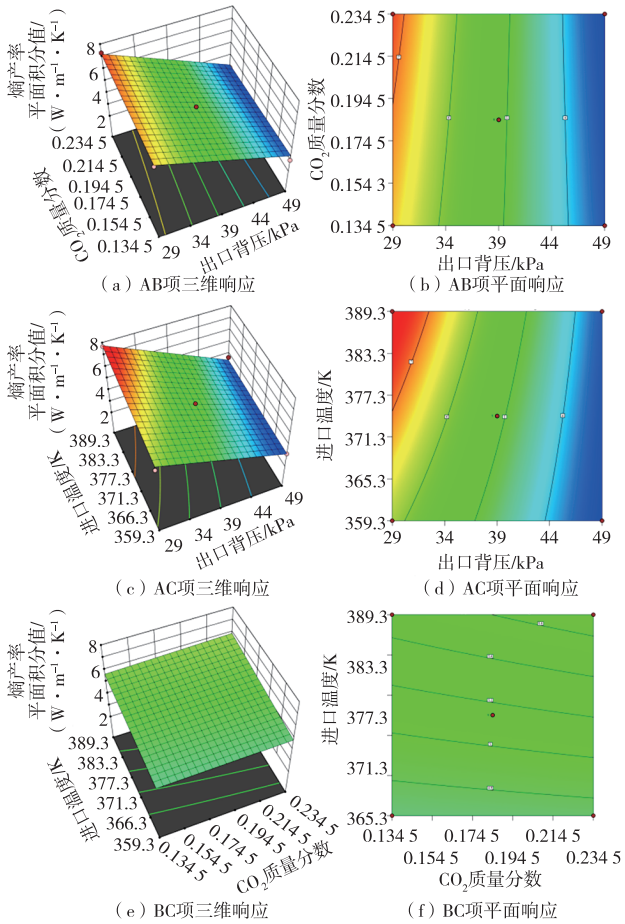


图 15 响应面实验结果

Fig. 15 Response surface experimental results

基于 17 组实验设计数据，采用二阶线性回归分析方法，对 3 个关键影响因素与平面熵产积分值 E 之间的复杂关系进行了深度解析。建立了包含一阶效应项及交互效应项的完整回归预测方程，该方程不仅有效量化了各因素对平面熵产积分值 E 的独立影响程度，更揭示了因素间潜在的非线性耦合机制，为后续的多目标优化及工艺参数调控提供了坚实的理论依据。

拟合得出的回归预测方程如下：

$$E=-30.527\ 17+0.702\ 271x_1-2.649\ 09x_2+0.106\ 436x_3-0.373\ 321\ 0x_1x_2-0.002\ 179\times x_1x_3+0.049\ 563x_2x_3 \tag{11}$$

式中：x_1 为出口背压；x_2 为 CO_2 质量分数；x_3 为工质进口温度。

4.3　Nelder-Mead 优化

所选 200 MW 透平叶栅出口的设计压力为 39 kPa，在实际工程运行工况下，透平入口混合工质的组分质量分数、入口温度及排汽背压等关键参数均可基于运行需求实施动态调控。

采用 Nelder-Mead 单纯形法，在背压为 29～49 kPa、进口 CO_2 质量分数为 0.134 5～0.234 5、进口温度为 359.3～389.3 K 的条件下，对回归预测模型实施优化求解。通过算法迭代，确定在熵产率最低条件下，最优参数组合为：背压 49 kPa、CO_2 质量分数 0.234 5、进口温度 359.3 K，对应最小目标函数值 $E=3.028\ 9$。

最优参数组合条件下，各因素对目标函数值 E 的影响效应分布见图 16。可观察到，出口背压对平面熵产率积分值的主导作用最为显著，两者呈现强负相关关系。相较之下，混合工质中 CO_2 质量分数及入口温度对平面熵产率积分值的影响程度较弱，具体表现为：随着 CO_2 质量分数的增加，平面熵产率积分值呈微弱下降趋势；而入口温度升高时，平面熵产率积分值则呈现微弱上升态势。

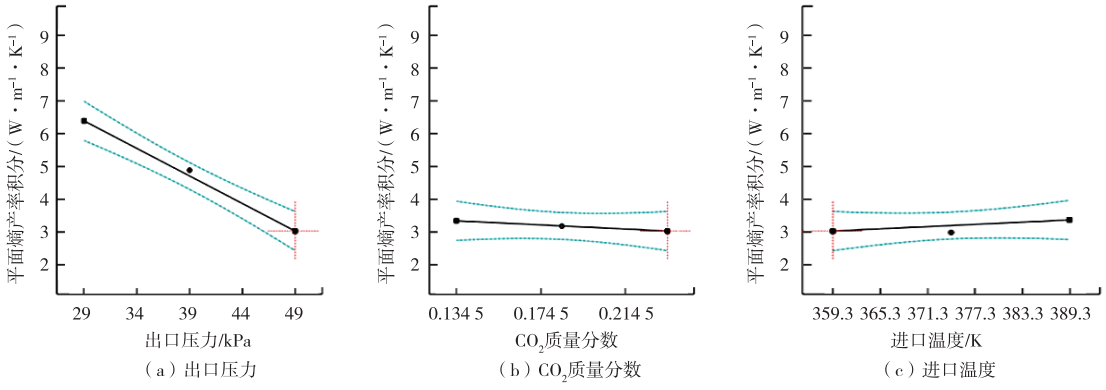


图 16　最优参数下各因素对目标函数的响应

Fig. 16　Responses of each factor to objective function under optimal parameters

5　结论

（1）CO_2 的质量分数从 13.45% 增加到 23.45%，混合工质整体的比热比发生改变，内尾缘激波和外尾缘激波强度增加，内/外尾缘激波夹角由 136°缩小至 125°。随着入口温度升高，成核区呈现系统性后移趋势，凝结激波对超声速气动激波的干涉强度随之衰减，从而导致流场内激波增强。

（2）当背压为 29 kPa 时，叶栅尾缘附近形成具有典型双波结构的内、外双斜激波系；随着背压增至 49 kPa，通道内膨胀效应衰减，导致激波强度降低，同时内/外尾缘激波向上游迁移且两者间夹角由 38°扩展至 54°，揭示了背压升高通过削弱通道膨胀效应，造成激波系统重构的物理机制。

（3）在响应面法对平面熵产率积分值的影响因素评估中，出口背压对熵产率空间积分值的主导效应最显著，CO_2 质量分数和入口温度对熵产率作用程度较小。采用 Nelder-Mead 单纯形法对熵产率进行最小优化求解，最优参数组合为：背压 49 kPa、CO_2 质量分数为 23.45%、进口温度 359.3 K。

参考文献：

[1] MOSES C A, STEIN G D. On the growth of steam droplets formed in a Laval nozzle using both static pressure and light scattering measurements[J]. Journal of Fluids Engineering, 1978, 100(3): 311-322.

[2] BAKHTAR F, EBRAHIMI M, WEBB R A. On the performance of a cascade of turbine rotor tip section blading in nucleating steam: part 1: surface pressure distributions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical

Engineering Science, 1995, 209(2): 115-124.

[3] DYKAS S, MAJKUT M, STROZIK M, et al. Experimental study of condensing steam flow in nozzles and linear blade cascade[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 50-57.

[4] SHABANI S, MAJKUT M. CFD approach for determining the losses in two-phase flows through the last stage of condensing steam turbine[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 253: 123809.

[5] BIAN Jiang, JIANG Wenming, HOU Danyang, et al. Condensation characteristics of CH_4-CO_2 mixture gas in a supersonic nozzle[J]. Powder Technology, 2018, 329: 1-11.

[6] 曹挺, 黄伟光, 张靖煊. 基于 He-N_2 混合工质的闭式 Brayton 循环系统及设备的优化设计[J]. 动力工程学报, 2019, 39(2): 155-162.
CAO Ting, HUANG Weiguang, ZHANG Jingxuan. Optimal design of a closed Brayton cycle system based on He-N_2 working fluid[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2019, 39(2): 155-162.

[7] 林智博, 陶乐仁, 邱晗, 等. 超临界 CO_2/R41 混合工质在螺旋槽管内冷却流动传热特性的数值研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(9): 793-799.
LIN Zhibo, TAO Leren, QIU Han, et al. Numerical study on flow and heat transfer characteristics of supercritical CO_2/R41 mixtures in spirally fluted tube [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(9): 793-799.

[8] ZHANG Hanlin, WU Haomin, LIU Dong, et al. Experimental investigations on heat transfer to H_2O/CO_2 mixtures in supercritical region[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 116: 104706.

[9] 刘晓薇. H_2O/CO_2 混合工质凝结流动特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
LIU Xiaowei. Analysis on condensation flow characteristics of H_2O/CO_2 gas mixture [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.

[10] WYSLOUZIL B E, HEATH C H, CHEUNG J L, et al. Binary condensation in a supersonic nozzle[J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 113(17): 7317-7329.

(上接第 26 页)

[18] CHOI J, KIM J, LEE J, et al. Genetic algorithm-based optimal film cooling design for gas turbine endwalls under real operating conditions[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(6): 066124.

[19] 高尚鸿, 汪翔宇, 张韦馨, 等. 数据驱动在透平叶片冷却设计中的应用进展[J]. 动力工程学报, 2024, 44(11): 1780-1789.
GAO Shanghong, WANG Xiangyu, ZHANG Weixin, et al. Progresses on the application of data-driven methods in turbine blade cooling design[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(11): 1780-1789.

[20] 张小伟, 王延荣, 张潇, 等. 涡轮机械叶片的流固耦合数值计算方法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1622-1626.
ZHANG Xiaowei, WANG Yanrong, ZHANG Xiao, et al. Numerical method for fluid-structure interaction in turbomachinery bladings[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1622-1626.

[21] KWAK J S, RESEARCHER S, HAN J C. Heat transfer coefficients on the squealer tip and near squealer tip regions of a gas turbine blade[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(4): 669-677.

[22] 董平. 航空发动机气冷涡轮叶片的气热耦合数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 45-52.
DONG Ping. Research on conjugate heat transfer simulation of aeroturbine engine air-cooled vane[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 45-52.