

二维叶栅内 H_2O/CO_2 混合工质凝结 流动特性及激波演化

韩旭, 施海波

(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)

摘要:为研究超临界水煤气制氢技术中所用混合工质透平低压级内的非平衡凝结流动特性和激波演化规律,建立了二维叶栅通道,设置 CO_2 质量分数为 0%, 10%, 20%, 30%, 40% 5 种不同组分混合工质,采用自编程序的双组分凝结模型对透平低压级 H_2O/CO_2 混合气体进行数值模拟,研究二维叶栅内混合工质凝结流动特性及伴随的激波效应。结果表明: CO_2 作为不凝气体对混合工质的凝结产生了抑制, CO_2 组分含量从 0% 增加到 40% 过程中,混合工质中的 H_2O 分压逐步减小,凝结速度减慢,凝结位置向后移动,液滴增长区域面积减少了 37.56%,流道最大湿度从 0.048 6 降低到 0.028 7; CO_2 组分含量增加使得水蒸气凝结量减少,释放凝结潜热产生的压力脉动减小,对气动激波的干涉作用减弱,叶栅通道内激波效应增强; CO_2 组分含量的不同会引发水蒸气凝结位置的变化,凝结压力脉动的位置也随之改变,最终导致叶栅尾缘激波形态发生改变。

关键词:混合工质;跨音速叶栅;非平衡凝结;激波演化

中图分类号:TM621 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.06.007

[引用本文格式] 韩旭,施海波. 二维叶栅内 H_2O/CO_2 混合工质凝结流动特性及激波演化[J]. 热能动力工程, 2025, 40(6): 65-71. HAN Xu, SHI Haibo. Condensation flow characteristics and shock wave evolution of H_2O/CO_2 mixed working fluid in a 2D cascade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(6): 65-71.

Condensation Flow Characteristics and Shock Wave Evolution of H_2O/CO_2 Mixed Working Fluid in a 2D Cascade

HAN Xu, SHI Haibo

(Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology,
North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)

Abstract: To investigate the condensation flow characteristics and shock wave evolution law in the low-pressure stage of mixed working fluid turbines for supercritical water gasification hydrogen production technology, a two-dimensional cascade channel was established. Five different working fluid compositions with CO_2 mass fractions of 0%, 10%, 20%, 30% and 40% were set up. A self-programmed two-component condensation model was employed to numerically simulate the H_2O/CO_2 mixtures in the turbine low-pressure region. The condensation flow characteristics and associated shock wave effects of mixed working fluid in 2D cascade were studied. The results demonstrate that as a non-condensable gas, CO_2 inhibits the condensation process of mixed working fluid. In the process of CO_2 content increasing from 0% to 40%, the partial pressure of H_2O is reduced gradually, condensation velocity reduces, condensa-

收稿日期:2024-12-22; 修订日期:2025-03-21

基金项目:河北省自然科学基金项目(E2023502025);河北省高等学校科学研究项目青年拔尖项目(BJ2025053);国家自然科学基金项目(52106042);中央高校基本科研业务费项目(2024MS145)

Fund-supported Project: Natural Science Foundation of Hebei Province (E2023502025); Science Research Project of Hebei Education Department (BJ2025053); National Natural Science Foundation of China (52106042); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2024MS145)

作者简介:韩旭(1991-),男,华北电力大学副教授。

tion position moves backward, the droplet growth zone area is decreased by 37.56%, and the maximum humidity in the flow path is reduced from 0.048 6 to 0.02 87. Increasing CO₂ content reduces water vapor condensation quantity, and associated condensation latent heat release leads to diminished pressure pulsations that weakens the interference effect on aerodynamic shocks, thereby intensifying shock wave effects in the cascade channel. Variations in CO₂ content alter both the water vapor condensation location and corresponding pressure pulsation position, ultimately modifying the shock wave morphology on the trailing edge of cascade.

Key words: mixed working fluids, transonic cascade, non-equilibrium condensation, shock wave evolution

引 言

随着世界各国对能源利用的要求朝着多元化、低碳化、清洁化发展,煤炭的清洁高效发电技术成为行业关注的重点。西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室郭烈锦院士团队创造性地提出了基于超临界水气化的煤制氢发电多联产技术。超临界水煤气化制氢发电多联产系统中,混合工质透平是实现热功转换的重要设备。相较于传统的汽轮机,进入透平内的不再是纯水蒸汽,而是超临界水和 CO₂ 的混合流体,其物性发生变化,且 CO₂ 的存在使透平末级低压区的凝结流动发生变化^[1-2]。王巍等人^[3-4]对叶栅内 H₂O/CO₂ 混合气体的凝结流动特性进行了研究,发现 CO₂ 的存在使得初凝位置靠后,流道最大过冷度增大,出口温度和工质速度降低。丁星岩^[5]在平行圆管上对含二氧化碳的水蒸气开展了冷凝换热研究,发现随二氧化碳组分含量的升高,冷凝换热效果迅速下降。

叶栅跨音速非平衡凝结流动会引起液滴水蚀,危害叶片安全,同时,高声速的流动还会引发激波现象并带来激波损失。Dykas 等人^[6]搭建了纯水蒸汽流动试验台,采用静压测量和纹影图像的方法对喷管和叶栅内压力波动和激波现象进行了捕捉。候天博^[7]在二维叶栅上对纯水蒸汽的凝结现象和激波效应进行了数值计算,对不同背压下的激波损失进行了分析。牛佳宝等人^[8]结合试验与数值方法,获得涡轮叶片在不同压比下的流场分布、激波损失分布、激波/尾迹和边界层干扰分布,并通过改进型线优化了整体损失。

国内外对 H₂O/CO₂ 混合工质流动计算的组分设置均是基于西安交通大学水煤气化制氢发电系统

的实验数据,该系统配套的混合工质透平入口 CO₂ 含量设定为 20% 左右。本研究以文献[6]所用叶栅为研究对象,对 0~40% 组分含量的 H₂O/CO₂ 混合工质在叶栅通道内的凝结流动参数和激波演化过程进行了研究。将自主建立的双组分凝结模型应用于文献[9]中的 N₂/H₂O 喷管实验进行验证。在通过对比喷管轴线上热力学参数与实验数据,确认模型对凝结效应具有足够计算精度后,在二维叶栅上研究 CO₂ 对凝结现象和激波演化过程的作用原理。未来可进一步计算三维汽轮机低压缸内存在的湿汽损失及激波损失,预测最佳 CO₂ 掺混条件,为高参数混合工质透平的叶型设计提供指导。

1 数值模拟

1.1 湿蒸汽两相流动控制方程

在多组份流体输运方程的基础上,基于 Euler/Euler 双流体模型建立流动方程,气液两相均在 Euler 坐标系中求解。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和液相控制方程。质量、动量、能量守恒方程基于气液混合相建立:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = -\Gamma \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} (\delta_{ij}) \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{\text{eff}} \right] - \Gamma (h - h_{lv}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: ρ —某相密度, kg/m³; t —时间, s; x_i 、 x_j —方向坐标矢量; u_i 、 u_j —速度矢量; Γ —液相质量增长

率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; λ_{eff} —有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
(T_{ij})_{eff}—有效应力张量; δ_k —Kronecker delta 数。

方程中混合相的物性采用质量加权平均或体积加权平均如式(4)~式(5)所示:

ζ —混合相的焓、熵、能量等热力学参数:

$$\zeta = Y\zeta_l + (1 - Y)\zeta_v \tag{4}$$

χ —密度、分子量、粘度、热导率等参数:

$$\chi = \alpha_l\chi_l + (1 - \alpha_l)\chi_v \tag{5}$$

式中: l —液相参数标识; v —气相参数标识; Y —液相质量分数, %; α_l —液相体积分数, %。

凝结过程中单位质量水蒸汽中的水滴数目可以达到 10^{18} , 甚至更多, 因此 H₂O/CO₂ 混合工质湿蒸汽中的液相可以视作连续介质。在无滑移的假设下, 液相控制方程需要对水滴的状态分布进行描述, 包括水滴数 N 和水滴平均半径 $\bar{r}$ 。液相质量分数的定义:

$$Y = \frac{4}{3}\pi \bar{r}^3 \rho_l N \tag{6}$$

式中: $\bar{r}$ —液滴平均半径, m; ρ_l —液相密度, kg/m^3 ;
 N —液滴数量, 个。

结合式(5)、式(6)建立液相控制方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j N) = J_{\text{ICCT}} \\ \frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_j Y) = \Gamma \end{cases} \tag{7}$$

式中: J_{ICCT} —成核率, m^{-3}/s ; $\bar{u}_j$ —气液混合相速度矢量。

1.2 湿蒸汽数值计算方法

湍流模型采用 SST $k - \omega$ 模型, 气液两相使用相等的湍流粘性系数, 离散格式默认为一阶迎风格式; 流动控制方程的对流项选用高分辨率迎风格式, 壁面函数选用 scalable wall function。设定求解时间步长为 0.000 1 s, 以均方根残差 (RMS) $< 10^{-5}$ 作为收敛标准。

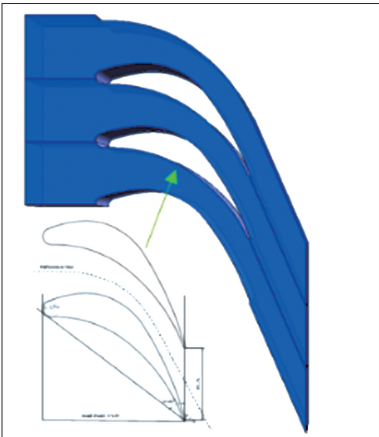
利用 Fluent 求解器对 H₂O/CO₂ 混合工质非平衡凝结流动进行数值分析时, 需要使用用户自定义标量 (User Defined Scalar, UDF) 对液相控制方程中的液相质量分数 Y 以及液滴数 N 的标量方程进行补充, 以实现液相的精确描述。使用用户自定义函数 (User Defined Function, UDF) 实现源项的添加, 包括流动控制方程中的质量源项和能量源项以及标量

方程中的源项, 以实现两相间质量和能量的交换。此外, 使用 DEFINE_PROPERTY 宏对混合气体的热力学性质进行了定义, 如混合气体的导热系数、动力粘度、扩散系数等。

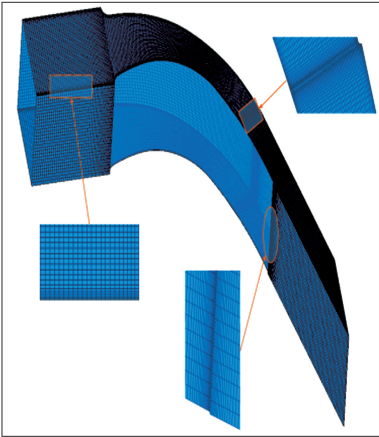
物性参数定义完成后还需为各相气体添加状态方程以实现方程封闭, 水蒸汽选用能够精确描述低压及饱和状态下水蒸汽性质的三阶 Virial 状态方程, CO₂ 采用 P - R 状态方程, 并使用 UDRGM (自定义模型) 对 H₂O/CO₂ 混合相状态方程进行描述。

1.3 模型建立及网格划分

为研究混合工质透平内的凝结流动现象, 采用文献[6]中所用 Dykas 叶栅为研究对象, 建立其几何模型, 其几何尺寸参考文献[6]。采用 ICEM 软件进行网格划分, 并对叶片表面和尾缘处的网格加密处理, 如图 1 所示。



(a) 几何结构



(b) 网格划分

图 1 Dykas 叶栅^[6]几何结构及网格划分
Fig. 1 Geometry and meshing of Dykas cascade^[6]

1.4 网格无关性验证

为了验证模型准确性和网格无关性,选择网格数分别为 69 万,106 万,133 万和170 万进行对比验证,进口总压为 89 kPa,进口总温为 374.3 K,工质组分为纯水蒸汽,叶表压力曲线与实验点的对照见图 2。发现网格数大于 133 万时,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。

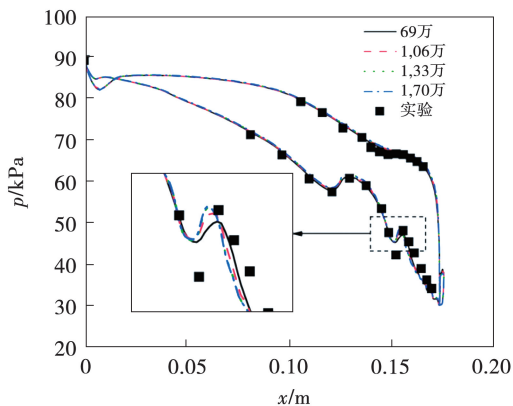


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Mesh independence verification

2 双组分凝结模型实验验证

目前,国内外尚无 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 混合工质凝结流动的实验数据,为确保本研究凝结模型计算可靠性,需另找一种物性相似的混合工质进行替代实验。非平衡凝结现象是指蒸汽在未达到热力学平衡的过冷条件下发生凝结的过程,其特点为凝结速率显著偏离平衡状态,通常伴随过饱和现象。混合工质中 H_2O 的非平衡凝结发生在透平末级流道,此区域热力学参数较低, CO_2 不发生凝结现象,其与 N_2 整体物性相似,均可当作不凝结气体处理,所以选取了文献[9]中的 $\text{N}_2/\text{H}_2\text{O}$ 喷管实验结果进行模型验证。图 3 展示了采用 Wyslouzil^[9] 喷管进行数值计算得出的轴向压力分布云图和截面湿度云图分布,沿着轴线方向压力逐步下降,在凝结点($x = 28 \text{ mm}$)处产生非平衡凝结现象,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。

图 4 为采用 Wyslouzil 喷管中轴取样线上数值计算压力与文献[9]实验数据的对比验证图,选取

喷管模型的中轴线作为取值区域,取该轴线上的压力值与文献[9]实验数据进行对比,模拟得出的压力分布与实验数据趋势一致,压力值误差保持在 5% 以内,综上所述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。

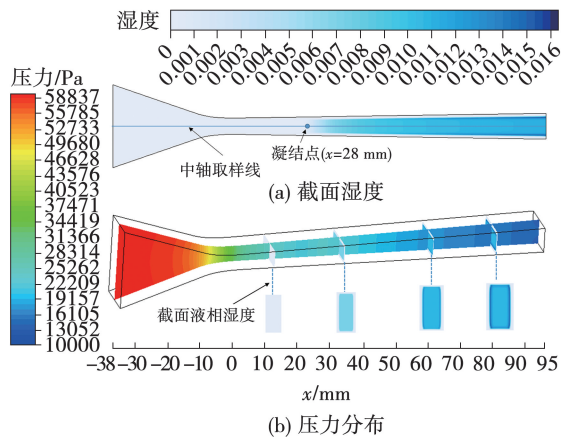


图 3 喷管压力分布与截面湿度云图

Fig. 3 Nozzle pressure distribution and cross-sectional humidity contour

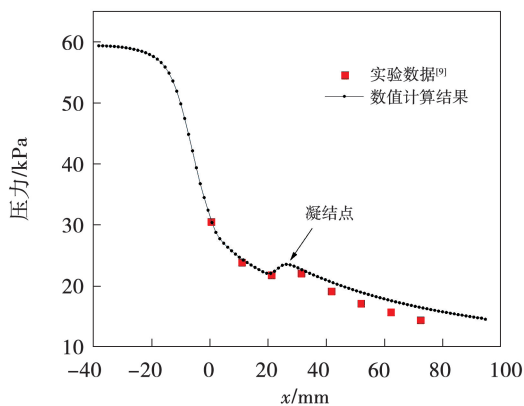


图 4 实验数据验证

Fig. 4 Experimental data validation

3 掺入 CO_2 后对非平衡凝结的影响

3.1 凝结过程压力、温度变化

以 Dykas 二维叶栅作为基础研究模型,选用 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体作为流动工质,对混合工质的凝结流动特性开展数值研究。控制叶栅入口混合工质的组分含量,初步设置了 5 种对比工况(水蒸气中分别掺入 0%、10%、20%、30% 和 40% 质量分数的 CO_2),入口压力均为 89 kPa,入口温度为 374.3 K。为精确获取流道内混合工质凝结流动的参数分布,在叶栅尾部流道中线上划分了一条取值线,将取值

线分成 100 个等距采样点,分别为 F_0 、 F_1 、 F_2 ... F_{100} , 如图 5 所示。

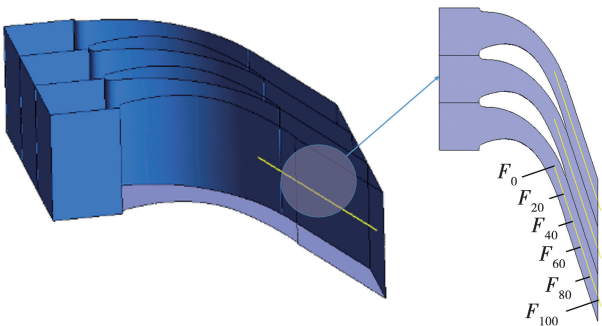


图 5 数据点取值区域

Fig.5 The area where the data point is valued

图 6 为不同工质组分下叶栅流道取值线上的压力和温度曲线。

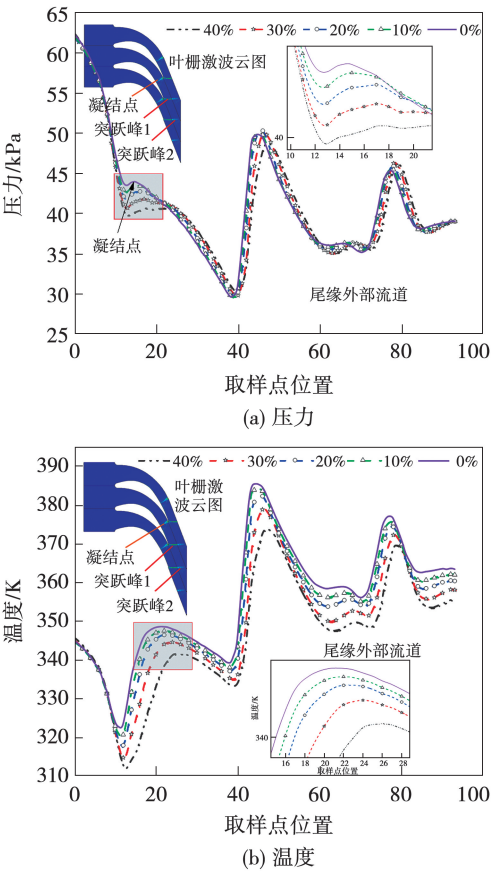


图 6 不同二氧化碳组分含量下混合工质压力和温度分布
Fig.6 Pressure and temperature distributions of mixed working fluids at different CO₂ contents

以纯水蒸气工况为例,在第 15 个取样点位置 F_{15} (凝结点)处混合工质中的水蒸气发生非平衡凝结现象,释放出的潜热造成了温度、压力突跃峰,在第 44 和

第 80 个取样点位置(F_{44} 和 F_{80}),受下级叶片外尾缘激波影响,同样产生了两个压力、温度突跃峰。总体来看,不同组分工质在该取值区域的压力、温度变化趋势基本相同,但掺入 CO₂后混合工质的压力突变的位置区域比纯水蒸气略微靠后。CO₂从 0% 增加到 40%, 水蒸气分压变小,凝结现象受到抑制,液滴凝结释放的潜热量减少,凝结突跃点的位置向后移动了 16 个取样点且突跃幅度变缓。图 6(a) 蓝色区域为叶片尾缘外部流道区,CO₂从 0% 增加到 40%, 此区域内 2 个由激波引起的突跃峰位置也发生了后移。这是因为 CO₂的掺入,使非平衡凝结受到抑制,液滴凝结区位置后移,凝结产生的压力脉动减弱。随着混合工质中 CO₂组分含量逐步增加,凝结激波与气动激波的耦合作用减弱,叶栅尾缘激波位置向后移动。

3.2 流道湿度分布

工质热力学过冷度是影响液滴成核的重要参数,当过冷度达到临界值时,混合工质中的水蒸气开始产生大量凝结,随后液滴核心逐步生长,叶栅通道内产生含湿气体,图 7 为二维叶栅平面流道湿度分布。CO₂含量从 0% 增加到 40% 的过程中,由于水蒸气分压减少导致非平衡凝结现象减弱,流道中最大湿度从 0.048 6 降低到 0.028 7。

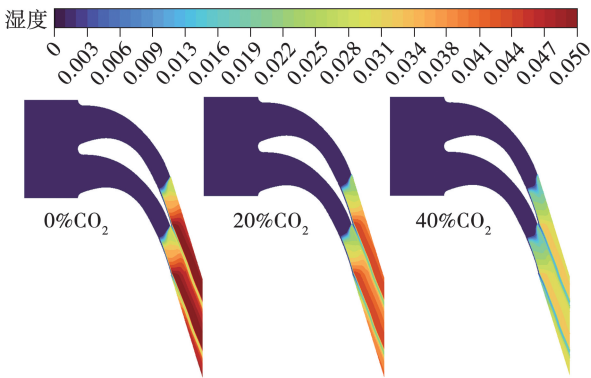


图 7 流道湿度分布

Fig.7 Flow path humidity distribution

液滴直径增长速率可以表征凝结过程中液滴的生长过程。图 8 为液滴直径增长速率情况,相比于纯水蒸气,掺入 CO₂的混合工质更晚到达凝结条件,其初凝区位置向下游移动且液滴增长区域不断缩小。CO₂含量从 0% 增加到 40% 的过程中,凝结速率降低,成核位置向后移动,液滴直径增长区域面积缩减 37.56%,印证了 CO₂作为不凝气体对混合工质凝结的抑制作用。

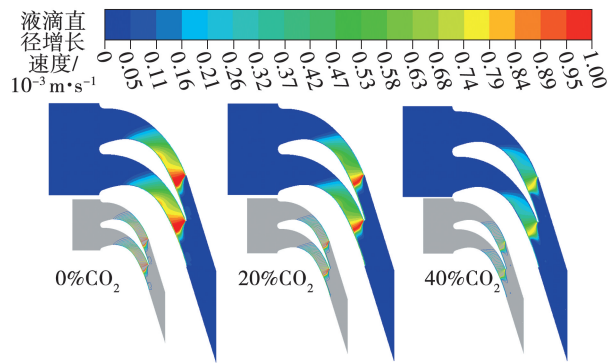


图 8 液滴直径增长速率分布

Fig. 8 Distribution of droplet diameter growth rate

4 激波演化

在叶栅超音速流动中,叶片尾缘会产生激波现象,激波前后会产生显著的压力、温度等参数的阶跃,造成剧烈的流动不稳定现象。混合工质在叶栅中的流动过程,除了会造成气动激波外,还伴随着非平衡凝结现象引发的凝结激波,两者对工质流动会产生共同干涉造成流场偏移。 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 混合工质中 CO_2 的含量会对凝结过程产生不同程度的抑制,使两种激波间干涉规律变得更加复杂。

气流在经过叶片尾缘附近壁面会绕流降压,最终汇聚于叶片尾缘末端并改变了流动方向,使得压

力侧和吸力侧的汽流流向一致,因此产生了两道指向两侧的斜激波,即内尾激波和外尾激波。指向通道内的称为内尾激波,另一个称为外尾激波,转向后的剪切层能量逐渐降低,在主流的带动下不断向下游发展而形成一道尾迹。

激波是超音速流场中产生的剧烈压缩波,其核心特征是激波区域马赫数突然下降,密度梯度产生突变,叶栅平面的马赫数场及密度梯度场可以展现激波的形态与发展。不同 CO_2 组分含量的混合工质马赫数云图与密度梯度数值纹影如图 9、图 10 所示,随着 CO_2 组分含量的增加,内尾缘激波处马赫数增加,场内密度梯度持续加强。

如图 9(a) ~ 图 9(c), CO_2 含量增加到 20% 过程中,内尾激波延伸距离增加,逐步与下一级叶片吸力面相接。 CO_2 组分含量大于 30% 后,凝结速度减慢使得场内激波现象进一步加强,内尾激波进一步延伸并产生反射现象,如图 10(d) - 图 10(e); 同时,内尾膨胀扇的上部分区域活动加强,范围不断扩大,内尾膨胀扇的下部分区域范围逐渐减少并向主流方向偏转。随着工质内 CO_2 组分含量增加,内尾激波和外尾激波的位置也向后移动,两激波间的夹角变小,尾迹区在内尾膨胀扇作用下逐步与外尾缘激波区发生掺混,造成局部范围涡流低速区域。

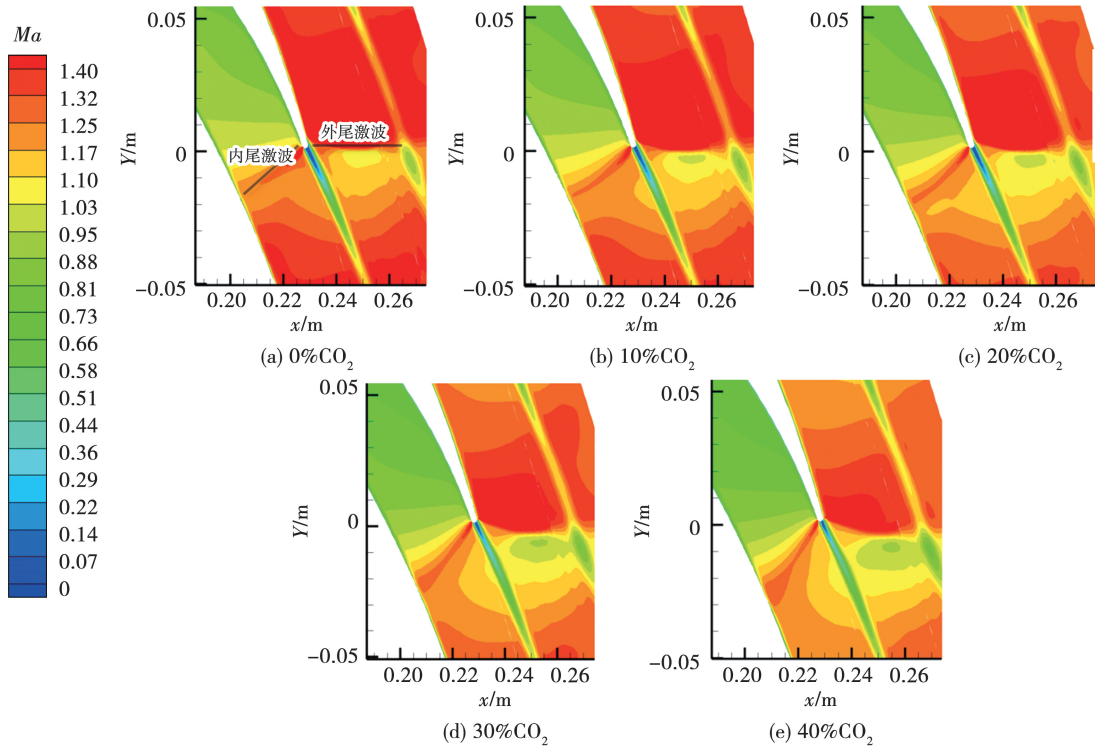


图 9 不同组分工况下马赫数云图

Fig. 9 Contour plots of Mach number under different component working conditions

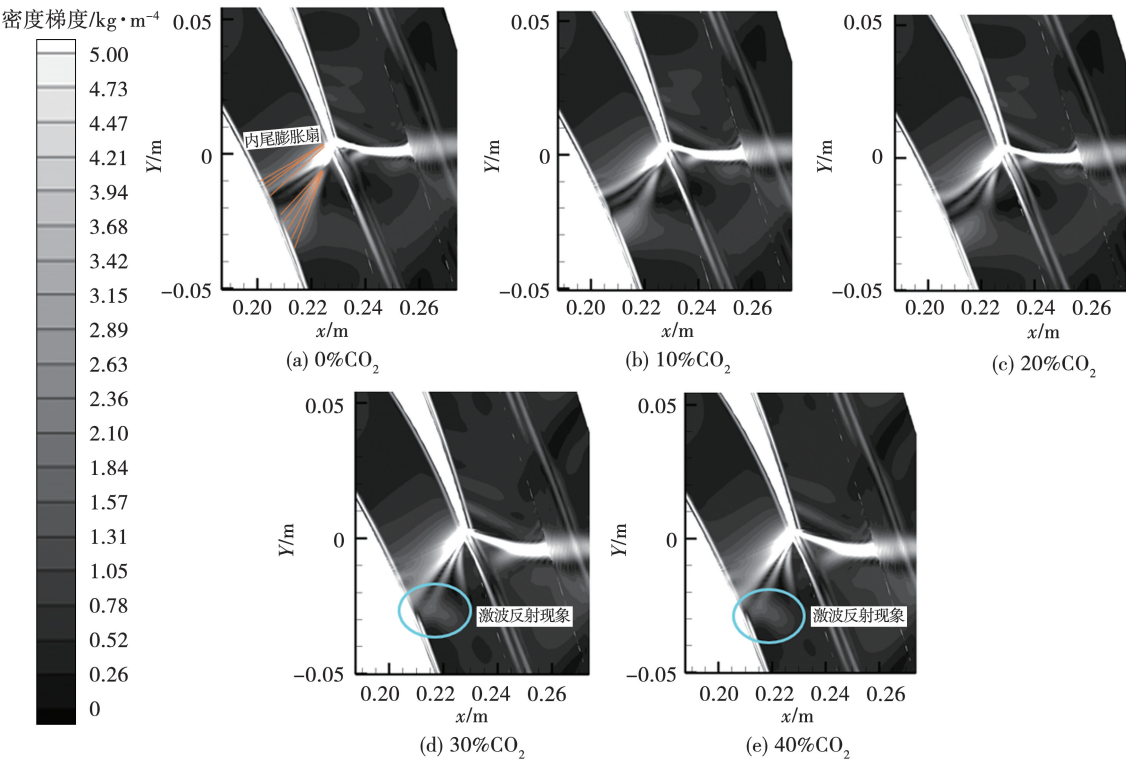


图 10 不同组分工况下密度梯度云图

Fig. 10 Contour plots of density gradient under different component working conditions

结合上文中对叶栅凝结压力脉动的分析,可以总结出不同组分混合工质超音速流动的激波演化作用规律:混合工质中 CO₂ 组分会抑制水蒸汽的凝结过程,使得释放凝结潜热产生的压力脉动减小,对气动激波的耦合作用减弱,导致尾缘激波强度增加。而此过程中,凝结位置向叶栅出口移动,叶片吸力侧产生凝结压力脉动的位置也随之后移,最终导致叶栅尾缘激波形态的改变。

5 结 论

本文采用自编的双组分凝结模型对 H₂O/CO₂ 混合气体进行数值模拟,研究了不同二氧化碳组分含量下,二维叶栅通道内混合气体非平衡凝结特性及激波效应,得出以下结论:

(1) 掺入不同组分 CO₂ 混合工质在叶栅出口取值区域的压力、温度变化趋势基本相同,但掺入 CO₂ 后混合工质的压力突变的位置区域比纯水蒸气略微靠后,且 CO₂ 含量越大,突变区域位置向后移动越多。CO₂ 含量从 0% 增加到 40% 的过程中,成核位置向后移动 16 个取样位置,液滴增长区域面积减少了 37.56%,流道最大湿度从 0.048 6 降低到 0.028 7。

(2) CO₂ 的掺入,使混合工质中 H₂O 的非平衡凝结受到抑制,凝结产生的压力脉动减弱,因此凝结压力脉动对气动激波的耦合作用减弱,导致尾缘激波强度增加。CO₂ 组分含量从 0% 增加到 20% 过程中,内尾激波延伸距离增加,逐步与下一级叶片吸力面相接;混合工质内 CO₂ 组分含量大于 30% 后,内尾激波进一步延伸并产生反射现象。

(3) 混合工质中 CO₂ 组分含量的增加会抑制水蒸汽的凝结过程,而此过程中,水蒸气凝结位置后移,叶片吸力侧凝结压力脉动的位置也向后移动,最终导致叶栅尾缘激波形态的改变。

参考文献:

[1] 周孝信,赵强,张玉琼,等. 双碳目标下我国能源电力系统发展趋势分析——绿电替代与绿氢替代[J]. 中国电机工程学报,2024,44(7):6707–6720,10003.
ZHOU Xiaoxin,ZHAO Qiang,ZHANG Yuqiong,et al. Analysis of the development trend of China's energy and power system under the dual carbon target:Green electricity substitution and green hydrogen substitution[J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(7):6707–6720,10003.