

扇贝仿生密封腔室内超临界二氧化碳泄漏流 湍动能耗散机理研究

张恩搏, 冯彦力, 吴一鸣, 沈明芊, 赵昆鹏, 白博峰
(西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为准确表征扇贝仿生密封腔室内超临界二氧化碳(sCO_2)泄漏流的复杂流动过程,揭示泄漏流湍动能耗散机理,提出了旋转机械强变物性真实气体流动高精度数值模拟方法。该数值模拟方法采用单体迎风格式实现数值通量分裂,通过高阶迎风方案实现数值通量三阶重构。所用欧拉全隐时间步进迭代方法支持多线程共享存储并行计算;采用了真实气体状态方程与亥姆霍兹自由能热物性查询表耦合迭代计算方法,可准确捕捉 CO_2 热物性非线性变化特征,计算偏差小于 0.5%;通过分子示踪实验验证了数值模拟方法的准确性,并深入分析了扇贝仿生密封腔室内泄漏流涡旋空间分布及其对湍动能耗散率的影响机理。研究表明: sCO_2 泄漏流进入密封腔室后发生膨胀,动能转化为压力势能,泄漏流当地马赫数降低至 0.1 以下,泄漏速率随之降低,泄漏流在高速转予剪切作用下产生涡旋并发生迁移、分裂和分离行为;泄漏流正则化螺旋度呈现正负值交替特征,表明密封腔室内存在多组顺、逆时针反向涡旋;每组反向涡旋有助于增强泄漏流湍动能耗散,无量纲湍动能耗散率大于 1.95×10^8 ,可有效改善密封封严性能;反向涡旋外缘交界点即为湍动能耗散率极值点,涡旋转向改变同样会增大泄漏流的湍动能耗散率。

关键词: 超临界二氧化碳;扇贝仿生密封;泄漏流;湍动能耗散;涡旋空间分布

中图分类号: TK05 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607002 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0013-11

Turbulent Kinetic Energy Dissipation Mechanism of Supercritical Carbon Dioxide Leakage Flow in a Scallop Bionic Seal Cavity

ZHANG Enbo, FENG Yanli, WU Yiming, SHEN Mingyu, ZHAO Kunpeng, BAI Bofeng
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To accurately characterize the complex flow process of supercritical carbon dioxide (sCO_2) leakage flow in a scallop bionic seal cavity and to elucidate the mechanism of turbulent kinetic energy (TKE) dissipation, a high-order numerical simulation method for real gas flows with strongly variable physical properties in rotating machinery was proposed. In this method, the uni-particle upwind scheme was employed for numerical flux splitting, while third-order numerical flux reconstruction was achieved via the simple high-resolution upwind method. Euler's fully implicit time-stepping iterative method was implemented, supporting open multi-processing (OpenMP) shared-memory parallel computing. A coupled iterative calculation method, integrating a real

收稿日期: 2025-10-29。 作者简介: 张恩搏(1992—),男,助理教授,硕士生导师;白博峰(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52506193);中国博士后创新人才支持计划资助项目(BX20240283);陕西省“三秦学者”创国家一流团队资助项目(2023STD03)。

网络出版时间: 2026-05-09

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260508.1008.008>

gas equation of state (EOS) with Helmholtz free energy-based thermophysical property lookup table, was adopted to accurately capture the nonlinear variations in CO_2 thermophysical properties, with calculation deviations below 0.5%. The accuracy of this numerical simulation method was validated through molecular tracing experiments. Furthermore, the spatial distribution of leakage flow vortices within the scallop bionic seal cavity and its impact on the TKE dissipation rate were analyzed in detail. The results indicate that as the sCO_2 leakage flow enters the seal cavity, expansion occurs, while the local Mach number remains below 0.1. Under the rapid shear of the rotor, the leakage flow generates vortices that exhibit migration, splitting, and separation behaviors. The normalized helicity of the leakage flow exhibits alternating positive and negative values, indicating the presence of multiple sets of counter-rotating (clockwise and counter-clockwise) vortices within the seal cavity. Each set of counter-rotating vortices increases the dimensionless TKE dissipation rate to over 1.95×10^8 , thereby effectively improving sealing performance. Moreover, the extrema of the TKE dissipation rate were identified at the outer boundaries of these counter-rotating vortices, where changes in vortex rotation direction also increase the TKE dissipation rate of the leakage flow.

Keywords: supercritical carbon dioxide; scallop bionic seal; leakage flow; turbulence kinetic energy dissipation; vortex distribution

超临界二氧化碳(sCO_2)布雷顿循环发电技术具有高功率密度、高转换效率、高集成度的特点,被视为清洁高效发电和能源综合利用的变革性新技术^[1-2]。利用 sCO_2 (压力大于 7.38 MPa, 温度高于 31.4 °C) 近临界物性突变减小压缩功、提高回热效率的特点, sCO_2 布雷顿循环发电技术在煤炭清洁利用^[3]、太阳能发电^[4]等民用领域与舰船动力^[5]、水下平台^[6]、高速飞行器^[7]等国防领域均具有重要应用价值,是面向国民经济发展和国防战略需求的重大技术突破。

高转速 sCO_2 压缩机是发电系统中的关键部件,其转子与静子微小间隙内的 sCO_2 泄漏已成为限制机组高参数稳定运行的关键瓶颈。压缩机轮缘处高压 sCO_2 沿盘腔转、静间隙流向转子腔,造成严重的转子风阻损失和工质损失^[8]。迷宫密封常被用以抑制转、静间隙内高压工质泄漏,但 sCO_2 压缩因子变化使其在密封腔室内难以充分膨胀与能量耗散,迷宫密封对 sCO_2 泄漏流的封严性能欠佳^[9]。泄漏流经过密封齿发生节流,高速流体进入下游密封腔室膨胀。然而, sCO_2 泄漏流在迷宫密封腔室内存在明显“穿透效应”^[10],即泄漏流经节流增速后未能充分膨胀而直接流出,导致密封泄漏速率陡增。实验结果表明^[11]:迷宫密封工质泄漏量最高可达系统循环质量流量的 2%,导致压缩机功率损失占其功耗的 25%以上。

受扇贝壳体波纹凹槽增强流体动能耗散原理

的启发^[12-14],本团队提出了扇贝仿生密封结构设计理念,通过在密封面周向交错布置波纹状腔室,强化泄漏流膨胀与能量耗散效应,可有效提升密封封严性能^[15]。然而,扇贝仿生密封实验测试与模拟结果存在偏差,密封腔室内强湍流涡旋与转子高速剪切耦合会影响 sCO_2 泄漏流能量耗散,上述复杂物理行为难以通过测试技术准确表征。密封腔室空间狭小, sCO_2 在高速转子剪切作用下存在强湍流涡的挤压、碰撞等复杂流动过程, sCO_2 热物性在近临界区随温度、压力变化而发生非线性畸变^[16],常规数值模拟中所采用的压力耦合方程的半隐式算法(SIMPLE)^[17-18]、算子分裂的压力隐式算法(PISO)^[19]等压力基算法,虽已逐步发展并拓展至变密度流动问题,但求解高雷诺数超临界流体流动过程时仍存在网格单元边界通量守恒性差的问题。完全可压缩流体的压缩因子、当地马赫数及速度特征值突变会造成控制方程刚性问题突出^[20],计算易出现伪解与数值振荡。

针对上述问题,本文提出了旋转机械强变物性真实气体流动高精度数值模拟方法,采用高阶精度通量重构格式与真实气体热物性耦合迭代计算方法,并分析了扇贝密封腔室内 sCO_2 泄漏流的复杂流动过程,阐明了密封腔室内泄漏流涡旋分布及其对能量耗散的影响机理。本文为扇贝仿生密封技术工程化应用提供了理论依据,可为 sCO_2 布雷顿循环发电技术长周期稳定运行提供技术支撑。

1 数值模拟方法

1.1 高阶通量重构格式

本文所用数值模拟方法以三维完全可压缩 Navier-Stokes(N-S)方程作为控制方程,并将其从物理真实空间坐标系 (x, y, z, t) 转换为计算空间广义坐标系 (ξ, η, ζ, t) , 有利于构建高阶通量计算格式,广义坐标系下 N-S 方程可表示为

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\mathbf{F} - \mathbf{F}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\mathbf{G} - \mathbf{G}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\mathbf{H} - \mathbf{H}_v)}{\partial \zeta} = \mathbf{S} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Q}$ 为守恒变量; $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为 ξ 、 η 、 ζ 3 个方向的无黏性项; $\mathbf{F}_v$ 、 $\mathbf{G}_v$ 和 $\mathbf{H}_v$ 分别为 ξ 、 η 、 ζ 3 个方向对应的黏性项; $\mathbf{S}$ 为源项。N-S 方程通过引入 Wilcox $k-\omega$ 湍流模型以实现封闭。

采用有限体积框架下单体迎风格式(UPUS)计算数值通量,通过将其分裂为质量通量和压力项。以 ξ 方向上质量通量为例,可定义为

$$\mathbf{F} = \frac{1}{J} (m\mathbf{\Phi} + p\mathbf{N}) \quad (2)$$

$$\mathbf{\Phi} = [1 \quad u \quad v \quad w \quad h]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{N} = [0 \quad \xi_x \quad \xi_y \quad \xi_z \quad -\xi_t]^T \quad (4)$$

式中: J 为 Jacobian 变换系数; p 为压力; $\mathbf{\Phi}$ 为数值通量分裂质量项矩阵; $\mathbf{N}$ 为压力项矩阵; m 为质量通量; u 、 v 和 w 分别为三维速度分量; h 为单位体积总焓。式(4)中 ξ_x 、 ξ_y 、 ξ_z 分别为分裂压力从真实空间坐标系 (x, y, z) 转为计算空间广义坐标系 ξ 方向所对应的变换系数, ξ_t 为时间步进系数。

数值通量根据 m 正负值确定迎风方向,并对压力进行修正,定义为

$$\mathbf{F} = \frac{m + |m|}{2} \mathbf{\Phi}_+ + \frac{m - |m|}{2} \mathbf{\Phi}_- + \tilde{p} \mathbf{N} \quad (5)$$

式中:压力修正项 $\tilde{p}$ 可表示为

$$\tilde{p} = \beta_+ p_+ + \beta_- p_- \quad (6)$$

其中,下角标+、-分别为网格单元左、右边界上的值, β 为压力修正系数,其范围为

$$\begin{cases} \beta_{\pm} = 1/4(2 \mp M \pm 1)(M_{\pm} \pm 1)^2, & |M_{\pm}| \leq 1 \\ \beta_+ = 1; \beta_- = 0, & M_{\pm} > 1 \\ \beta_+ = 0; \beta_- = 1, & M_{\pm} < -1 \end{cases} \quad (7)$$

其中, M 为当地马赫数。

在 UPUS 方法中采用高阶迎风法(SHUS)格式计算质量通量 m ,第 i 个网格的质量能量 m_i 和平均

当地马赫数 $\bar{M}_i$ 分别为

$$m_i = \frac{1}{2} \left[(\rho U_i)_+ + (\rho U_i)_- - |\bar{U}_i| \Delta \rho - \frac{|\bar{M}_i + 1| - |\bar{M}_i - 1|}{2} \bar{\rho} \Delta U_i - \frac{|\bar{M}_i + 1| - |\bar{M}_i - 1| - 2|\bar{M}_i|}{2} \frac{\Delta p}{\bar{c}} \right] \quad (8)$$

$$\bar{M}_i = \frac{\bar{U}_i}{\bar{c}}, \bar{U}_i = \frac{\bar{U}_{i+} + \bar{U}_{i-}}{2}, \bar{\rho} = \frac{\rho_+ + \rho_-}{2} \quad (9)$$

式中: ΔU 、 Δp 、 $\Delta \rho$ 分别为网格单元在坐标轴正向边界上的速度、压力和密度与其对侧边界值之差; $\bar{c}$ 是当地声速; $\bar{M}_i$ 、 $\bar{U}_i$ 、 $\bar{\rho}$ 和 $\bar{c}$ 分别为对应网格中心变量平均值。

在空间离散时,物理量平均值存储于网格单元体心,其空间分布信息缺失,数值格式精度仅为二阶。本文在数值重构过程中引入三阶守恒型单调迎风格式(MUSCL),以边界值重构物理量在网格单元内三阶空间分布,任意物理量空间分布 $\varphi(x)$ 围绕网格中心 φ_j 在 x 方向展开可得

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \varphi_j + \frac{1}{\Delta x} (x - x_j) \delta_j \varphi + \\ &\frac{3\kappa}{2(\Delta x)^2} \left[(x - x_j)^2 - \frac{(\Delta x)^2}{12} \right] \delta_j^2 \varphi, \\ x_{j-1/2} &\leq x \leq x_{j+1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: φ_j 为网格中心; x_j 为任意物理量 $\varphi(x)$ 在网格中心处的取值; δ_j 为 x_j 沿空间分布的一次导数; κ 为高阶系数,令 $\kappa = 1/3$ 可得三阶精度。

在重构过程中引入改进型 Venkatakrishnan 通量斜率限制器,以满足总变量不增条件^[21],并可解决数值计算时出现的数值振荡问题^[22-23]。

1.2 时间步进迭代方法

本研究采用欧拉隐式时间步进迭代方法以规避 Courant-Friedrichs-Lewy(CFL)条件限制。以 ξ 方向无黏通量 $\mathbf{F}$ 为例,对其进行离散,第 $n+1$ 步数值通量 $\tilde{\mathbf{F}}^{n+1}$ 可线性化为

$$\tilde{\mathbf{F}}^{n+1} = \tilde{\mathbf{F}}^n + \frac{\partial \tilde{\mathbf{F}}}{\partial \tilde{\mathbf{Q}}} (\tilde{\mathbf{Q}}^{n+1} - \tilde{\mathbf{Q}}^n) = \tilde{\mathbf{F}}^n + \tilde{\mathbf{A}}^n \Delta \tilde{\mathbf{Q}} \quad (11)$$

式中: $\tilde{\mathbf{F}}^n$ 、 $\tilde{\mathbf{A}}^n$ 分别为第 n 步 ξ 方向上的数值通量矩阵和 Jacobian 矩阵; $\Delta \tilde{\mathbf{Q}}$ 为迭代中待求矩阵。同理定义 $\tilde{\mathbf{B}}$ 和 $\tilde{\mathbf{C}}$, 式(11)可写为

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{I} + \lambda \Delta t \frac{\partial \tilde{\mathbf{A}}^n}{\partial \xi} + \lambda \Delta t \frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}^n}{\partial \eta} + \lambda \Delta t \frac{\partial \tilde{\mathbf{C}}^n}{\partial \zeta} \right] \Delta \tilde{\mathbf{Q}} = \\ - \Delta t \left[\left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{F}}}{\partial \xi} \right)^n + \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{G}}}{\partial \eta} \right)^n + \left(\frac{\partial \tilde{\mathbf{H}}}{\partial \zeta} \right)^n \right] \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; $\tilde{\mathbf{G}}$ 为 η 方向无黏通量; $\tilde{\mathbf{H}}$ 为 ζ 方

向无黏通量; λ 为导热系数。

为求解 $\Delta \tilde{Q}$, 通常先求解式(13)中系数矩阵的逆矩阵, 但稀疏矩阵的逆矩阵难以直接求解, 需采用高斯-赛德尔近似方法以实现迭代^[24]。本文引入时序一致性预处理高斯-赛德尔迭代方法(TCPGS), 可通过对式(12)中待求矩阵分解为下三角矩阵 L 、上三角矩阵 U 来实现快速迭代计算。

1.3 热物性耦合迭代方法

准确捕捉 $s\text{CO}_2$ 热物性变化对于模拟准确性至关重要。采用立方型彭-罗宾逊(P-R)真实气体状态方程^[26]构建热力学状态参数与压缩因子 Z 的关系如下

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + Z(A - 2B - 3B^2) - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (19)$$

式中: $A = ap/(R_g T)^2$; $B = bp/R_g T$; R_g 为气体常数。

基于 Z 因子, 可依次求解比定容热容、比定压热容等热物性参数。

密封腔室 $s\text{CO}_2$ 存在高速剪切、节流、膨胀等复杂流动过程, 工质热状态变化引发其热物性突变。对于拟临界区 CO_2 热物性非线性突变问题, 在 P-R 状态方程之上耦合基于亥姆霍兹自由能的热物性查询表, 可实现热物性突变区准确求解。在本团队前期研究中, 将该热物性耦合迭代方法与 NIST 数据库^[27]进行了对比验证, 偏差小于 0.5%^[15]。

1.4 数值模拟方法验证

采用本团队自主研发的分子示踪测速技术^[28]对高雷诺数 $s\text{CO}_2$ 速度场进行测量, 并与模拟结果对比以验证数值模拟准确性。超临界流体可视化测量实验系统如图 1 所示。

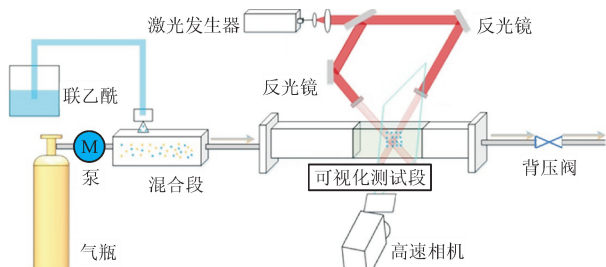


图 1 超临界流体可视化测量实验系统

Fig. 1 Schematic diagram of the visualization measurement system for supercritical fluids

实验工质 CO_2 经增压泵升压至 8 MPa, 流经示踪分子混合段后进入电加热段, 温度升高至超临界

状态温度以上, 进入可视化段完成速度场测量。可视化段是内径为 50 mm 的圆管。

采用丁二酮分子作为示踪分子, 使用 355 nm、10 ns 的激光器激发丁二酮分子的磷光特性, 并以长波通滤波片消除激光对成像的影响。采用高速相机开展成像采集, 单次实验连续记录 10 000 帧磷光示踪分子图像, 选取不同时间延迟对应的图像提取网格标记线的位移, 根据示踪分子位移与延迟时间之间的关系计算出速度场。实验工况如表 1 所示, 其中工况 2 入口 $s\text{CO}_2$ 热力学状态与密封入口相似。

表 1 $s\text{CO}_2$ 测速实验方案

Table 1 Schemes of the $s\text{CO}_2$ speed testing experiments

工况	入口流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	入口温度/ K	出口静压/ MPa	入口雷诺数/ 10^5
1	0.03	310	8	1.10
2	0.03	353	8	1.36

将 $t=0$ 时刻下示踪分子空间位置作为初始位置, 采用高斯拟合获得实验速度场分布, 该结果与计算流体力学(CFD)模拟结果对比如图 2 所示。对比结果表明: 两个工况下 $s\text{CO}_2$ 速度场存在时变特性, 随着拍摄时间持续, 速度场发展基本稳定; 在 $t=100 \mu\text{s}$ 时刻数值模拟结果略小于实验结果, 造成这个现象的主要原因是分子示踪测速技术的测量误差随流速增加而减小; 在 $t=300 \mu\text{s}$ 时刻, 随着速度场发展, 数值模拟结果与实验结果吻合。以上结果证明本文提出的数值模拟方法可用于密封腔室内 $s\text{CO}_2$ 流动高精度数值模拟。

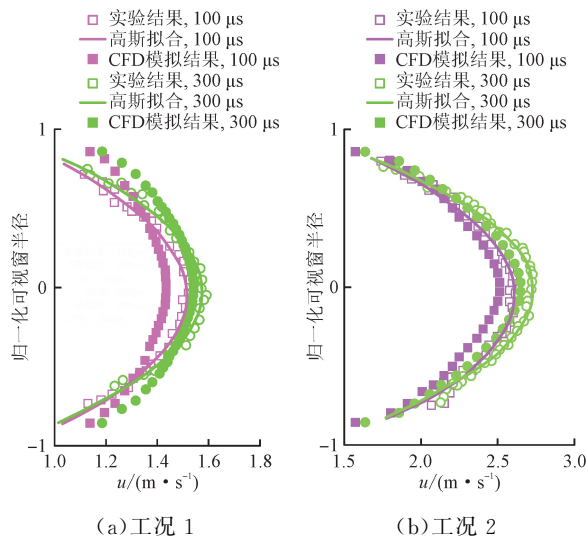


图 2 可视化测速实验与模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of experimental and simulation results

2 物理模型与计算设定

2.1 物理模型

针对本团队自主设计的百 kW 级 sCO_2 离心压缩机^[29],在叶轮轮背后侧设计扇贝仿生密封。扇贝仿生密封段转子半径为 23 mm,密封间隙为 0.2 mm。密封轴向设置 8 排密封腔室,每排 12 个扇贝仿生状密封腔室在圆周方向均匀分布,8 排密封腔室中奇数排(第 1、3、5 和 7 排)与偶数排(第 2、4、6 和 8 排)密封腔室之间交错角为 15° 。扇贝仿生密封腔室高度和轴向宽度均为 3 mm,主要结构参数如表 2 所示。

表 2 扇贝仿生密封结构参数
Table 2 Physical parameters of seal design

参数	数值	参数	数值
转子半径/mm	23	密封齿宽/mm	0.5
密封间隙/mm	0.2	腔室交错角/ $^\circ$	15
密封腔室轴向长度/mm	3	轴向腔数	8
密封腔室轴向高度/mm	3	圆周腔数	12

本研究所设计的扇贝仿生密封物理模型及其剖视图如图 3 所示。

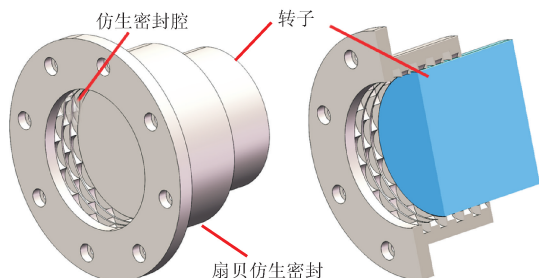


图 3 扇贝仿生密封物理模型及剖视图

Fig. 3 Physical model and sectional view of bionic scallop seal

2.2 结构化网格划分

抽取扇贝仿生密封腔室流体域,采用自编程序生成流体域全尺寸结构化网格如图 4 所示。

全尺寸结构化网格生成中考虑流体域在圆周方向上的周期性,采取以下措施。

(1)将 $1/12$ 周期性流体域划分为 124 个块,每个块单独生成结构化网格,密封腔采用 C 型和 Y 型拓扑结构网格,密封间隙沿径向生成不少于 21 个网格节点以捕捉流动细节,在任意近壁面网格第一层高度设置为 1.0×10^{-6} m,确保 $y^+ \approx 1$ 以适配 Wilcox $k-\omega$ 湍流模型。

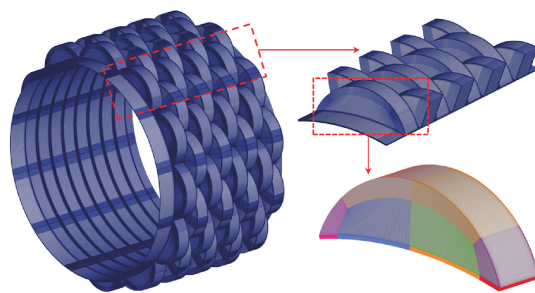


图 4 全尺寸流体域结构化网格

Fig. 4 Structured grids for fluid domain

(2)将各个块结构化网格按序编号,相邻块界面具有相同网格节点,通过界面节点实现多块结构化网格拼接与流场数据交互。

(3)在广义坐标系(ξ, η, ζ)下旋转并复制周期性网格,生成所有网格单元的坐标信息,并按照上述方法实现节点信息交互。

2.3 计算参数设定与网格无关性验证

根据本团队 sCO_2 离心压缩机气动设计,扇贝仿生密封腔室流体域设定计算参数如表 3 所示,其中入口总压为 10 MPa,入口总温为 329 K,出口静压为 5 MPa,转子转速为 30 000 r/min。

计算采用本研究所提出的数值格式,其中全隐式 TCPGS 时间步进迭代方法支持 Open Multi-Processing 共享存储并行计算。本研究采用 Intel Xeon Platinum 系列 CPU 开展计算,并将全尺寸流体域内 1 488 块结构化网格均匀分配给 CPU 中各个计算物理核,每次迭代计算网格节点间实现信息交互,以全局网格密度残差 L_2 范数小于 1×10^{-6} 为收敛标准。

表 3 计算参数设定

Table 3 Calculation parameter settings

参数	数值	参数	数值
入口总压/MPa	10	入口总温/K	329
出口静压/MPa	5	转子转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	30 000
库朗数	0.5	收敛残差	1×10^{-6}

在网格无关性验证中,生成初始网格单元数 102 万,并沿坐标系 3 个维度方向拓展网格节点数至原先数量的 1.4 倍,获得加密网格单元数 282 万。以此方法生成额外 4 套加密网格,网格单元总数分别为 769 万、2 112 万、5 794 万和 15 900 万。

网格无关性验证计算参数设定与表 3 一致,并定义不同网格计算下泄漏速率偏差,其定义为第 i 套网格和最大单元数(15 900 万)网格计算所得密封泄漏速率之间的偏差

$$\Pi = |\dot{m}_{\text{gr-max}} - \dot{m}_{\text{gr-}i}| / \dot{m}_{\text{gr-max}} \quad (20)$$

式中: $\dot{m}_{\text{gr-max}}$ 为最大网格单元数计算密封泄漏速率; $\dot{m}_{\text{gr-}i}$ 为第 i 套网格算例。图 5 为采用不同网格下扇贝仿生密封泄漏速率偏差,网格数为 2 112 万的算例与最大网格数算例所得结果的偏差小于 1%,且网格数增长已考虑 x 、 y 、 z 3 个方向同步变化,因此网格数为 2 112 万的结构化网格被用于后续分析研究。

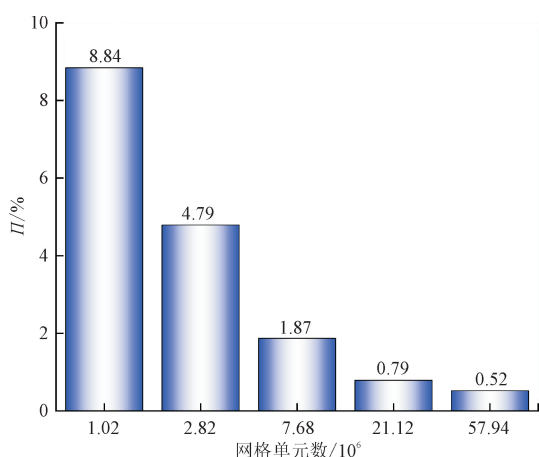


图 5 不同网格下密封泄漏速率偏差

Fig. 5 Leakage change rate for different grids

3 结果与讨论

3.1 密封腔室内泄漏流涡旋分布特性

图 6 给出了扇贝仿生密封腔室中泄漏流当地马赫数及涡旋空间分布。由图 6(a)可知,密封间隙内泄漏流进入第 1 排密封腔后迅速膨胀,其当地马赫数随之降低;泄漏流再经密封间隙进入下游第 2 排密封腔后连续膨胀,直至在末排密封腔内当地马赫数低于 0.1。

图 6 给出了密封腔室 1、3、5、7 内圆周速度 ω 及涡旋分布。密封腔内泄漏流在转子高速剪切作用下产生突出涡旋,腔室 1 涡旋占据整个腔室,涡旋中心在转子剪切作用下向左侧偏移;下游腔室 3 中涡旋与壁面碰撞发生涡旋分裂,且泄漏流经过多次膨胀流速显著降低;腔室 5 中两个涡旋在剪切流动下呈现反向运动,右侧逆时针旋转涡旋逐步增大,并在腔室 7 中占据主要空间。

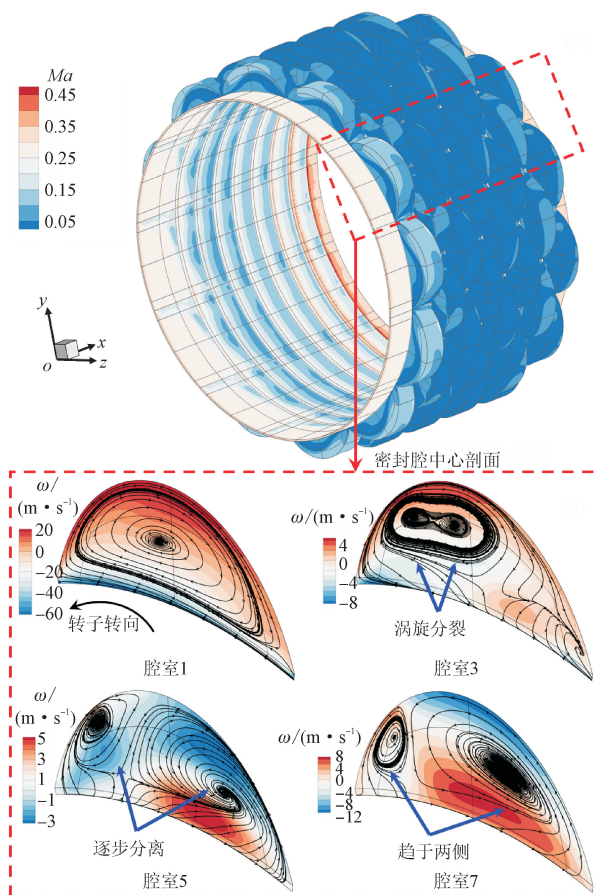


图 6 扇贝仿生密封腔室中泄漏流涡旋空间分布

Fig. 6 Spatial evolution of vortices in sealing cavities

正则化螺旋度 h_{nor} 可用于识别高速旋转机械中的涡旋演化,其反映了涡流矢量在流动方向上的投影^[29],可表示为

$$h_{\text{nor}} = \frac{\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\Omega}}{|\mathbf{u}| |\boldsymbol{\Omega}|} \quad (21)$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \nabla \times \mathbf{u} \quad (22)$$

式中: $\mathbf{u}$ 表示速度矢量; $\boldsymbol{\Omega}$ 表示涡矢量,即为速度矢量 $\mathbf{u}$ 的旋度。正则化螺旋度 h_{nor} 为无量纲参数,可反映涡旋运动方向与主流速度方向一致性,当其值越接近 1 表示趋于一致,反之亦然;而当 h_{nor} 接近 0,则表示涡旋趋于破碎分裂。

图 7 所示为扇贝仿生密封腔室中泄漏流正则化螺旋度 h_{nor} 空间分布。泄漏流 h_{nor} 在入口段密封间隙内为负值,即涡旋方向与转子剪切主流速度方向相反;随着泄漏流向密封间隙下游流动,涡旋在转子剪切作用下旋向转变。在密封腔室内,泄漏流膨胀后 h_{nor} 发生显著改变,其中以轴向腔室 3 和腔室 5 内 h_{nor} 分布差异尤为显著;腔室近壁面泄漏流 h_{nor} 出现多处近零区域,即涡旋分离为多个旋向各异的小尺

度涡,有利于能量耗散。

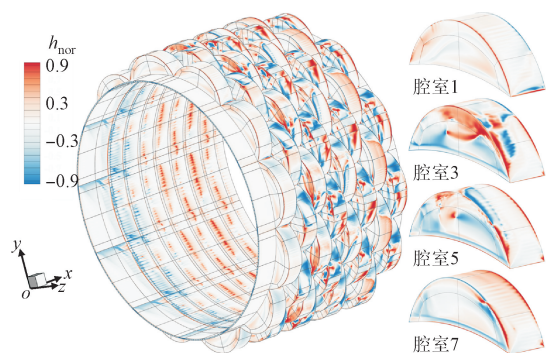


图 7 扇贝仿生密封中泄漏流正则化螺旋度

Fig. 7 Spatial distribution of normalized helicity

图 8 所示为密封腔室 1、3、5、7 内泄漏流 h_{nor} 的空间分布,其中每个腔室等间距取 3 个截面,沿轴向由左至右呈现各个界面上 h_{nor} 分布特性。腔室 1 内多个反向涡旋发生挤压、合并、再分裂;腔室 3 中泄漏流膨胀后在转子剪切作用下破碎分裂为数个小尺度涡旋,并在腔室内贴壁位移,在腔室末端合并;而腔室 5 中泄漏流受到转子剪切影响显著,最大涡旋旋向与主流速度方向保持一致,后随之破碎为多个反向涡旋;腔室 7 中,亦可观察到涡旋合并与分裂,涡旋的连续聚并和分裂均有利于泄漏流能量耗散。

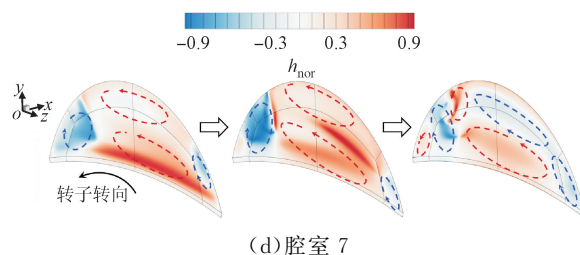
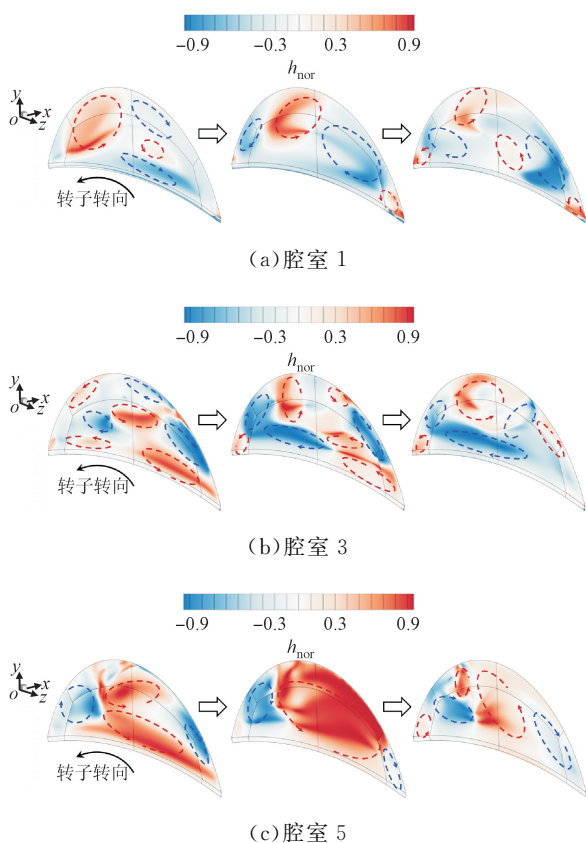


图 8 密封腔室中泄漏流正则化螺旋度空间分布

Fig. 8 Spatial evolution of vortices in sealing cavities

3.2 泄漏流涡旋脱落与分离

为表征密封腔室中涡旋分裂行为,采用 Liutex 涡识别方法^[30]捕捉涡旋分布,Liutex 涡识别定义为

$$R = \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{r} - \sqrt{(\mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{r})^2 - 4\lambda_{\alpha}^2} \quad (23)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为速度梯度张量的实特征向量; R 为流体刚性转动的双倍角速度; λ_{α} 为流体绕旋转轴圆周运动的角速度。

图 9 所示为腔室 3 和腔室 5 中泄漏流 $|R|=30$ 等值面涡旋空间分布。在腔室 3 和 5 中均可观察到显著的涡旋脱落现象。高速转子剪切驱动近壁面涡旋旋向与主流速度方向一致,但泄漏流在密封腔室内膨胀减速,导致涡旋脱落;脱落涡沿腔室内壁运动,与壁面发生碰撞后随之分离,进一步分裂为多个小尺度涡旋,并向腔室左侧移动。密封腔室内涡旋分布呈现显著的不对称性。

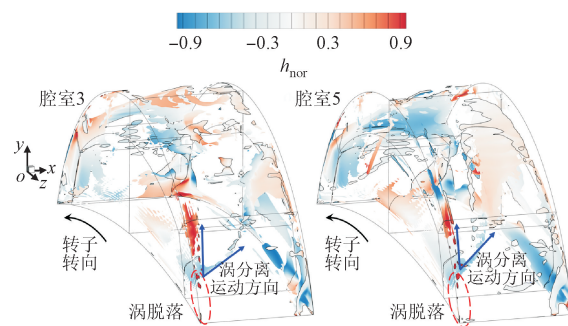


图 9 $|R|=30$ 时密封腔室中泄漏流涡旋脱落与分离

Fig. 9 Vortex shedding and separation in sealing cavities, $|R|=30$

3.3 泄漏流湍动能耗散

扇贝仿生密封的设计理念为增强变压缩因子流体在密封腔室膨胀过程中的能量耗散,进而实现高效封严作用。对于高雷诺数湍流,湍动能耗散率可直接反映湍流在膨胀过程中湍动能转为热能的程度。为分析密封腔室内泄漏流的湍动能耗散率空间分布,同时考虑热物性及密封结构对湍动能耗散的影响,定义无量纲湍动能耗散率

$$\epsilon^* = \frac{\epsilon D_H^2 \rho}{\mu(u^2 + v^2 + w^2)} \quad (24)$$

$$D_H = 2R_{Sta}(1 - R_{Rot}/R_{Sta}) \quad (25)$$

式中: D_H 为水力直径; R_{Sta} 为腔室内半径; R_{Rot} 为转子半径, $R_{Sta} = R_{Rot} + H + S$, H 为腔室高, S 为密封间隙。

图 10 给出了腔室 3 中心截面左 ($Z = -3 \text{ mm}$)、中 ($Z = 0$) 和右 ($Z = 3 \text{ mm}$) 3 条特征线上泄漏流无量纲湍动能耗散率 ϵ^* 与正则化螺旋度 h_{nor} 分布。如图 10(a) 所示, 沿着转子剪切方向(图 10 腔室中 $Z = 3.0 \text{ mm}$ 至 $Z = 0 \text{ mm}$ 至 $Z = -3.0 \text{ mm}$ 方向), 泄漏流 ϵ^* 峰值个数及数值均发生变化; 在腔室右侧 ($Z = 3.0 \text{ mm}$) 特征线上, ϵ^* 仅存在一个最大峰值且大于 1.8×10^8 ; 随着涡旋受剪切流动影响向左侧移动并出现破碎分离, 中心处 ϵ^* 因涡旋分离呈现两

个显著峰值, 但最大峰值降低至 3.4×10^7 ; 随着涡旋继续向左侧位移, 涡旋进一步破碎, ϵ^* 最大峰值降低至 1.0×10^6 。

图 10(b) 中所示正则化螺旋度 h_{nor} 分布可进一步反映 ϵ^* 空间分布变化: 腔室右侧存在逆时针涡旋和顺时针涡旋(转子逆时针旋转, $h_{nor} > 0$ 则为逆时针), 两个反向涡旋交界点即涡旋最外缘线速度最大, 进而造成该处 ϵ^* 最大, 该现象与图 10(a) 中右侧 ϵ^* 峰值纵坐标 $H = 0.75 \text{ mm}$ 相对应; 涡旋向左移动至中心处发生分裂, 此处存在逆时针、顺时针、逆时针旋转共 3 个涡旋, 涡旋交界点与 ϵ^* 两个峰值相对应; 在左侧破碎涡旋逐步消失, 此时仅存在逆时针、顺时针旋转两个涡旋, 交界点与 ϵ^* 单峰值对应, 且量级减小。

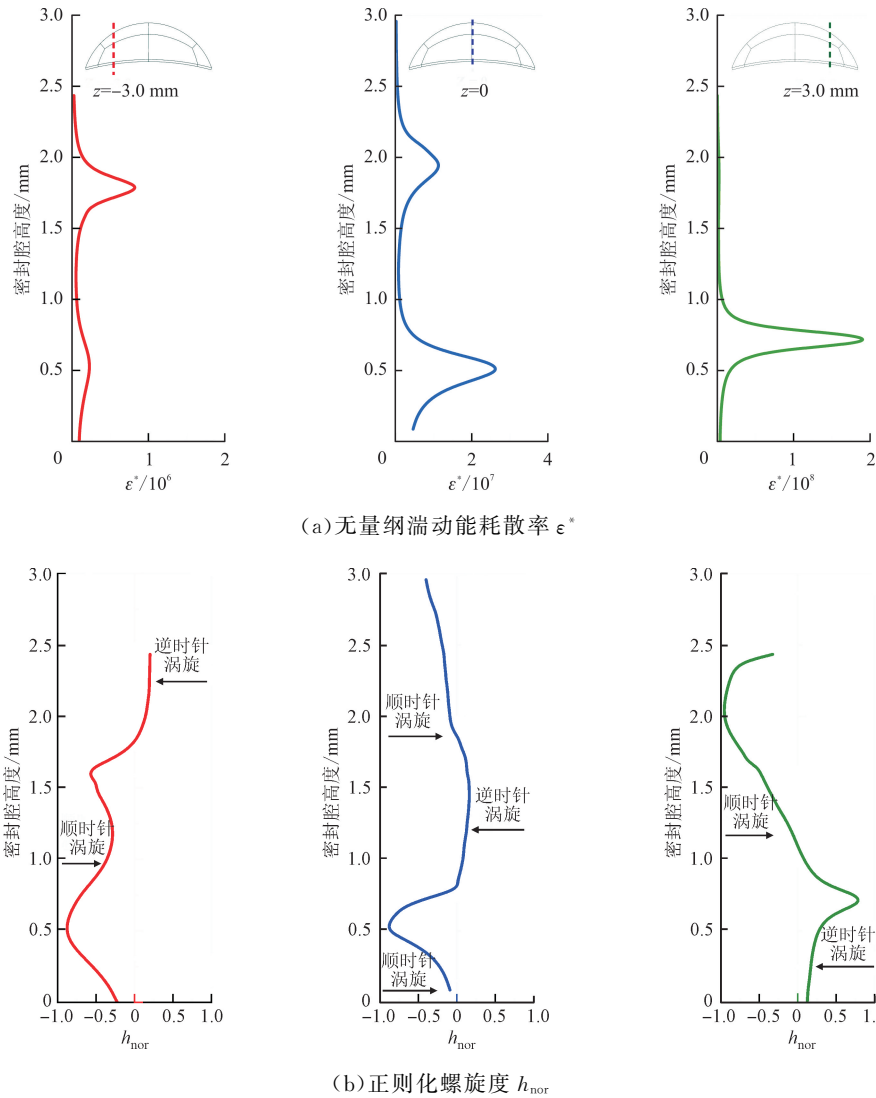


图 10 腔室 3 中泄漏流无量纲湍动能耗散率与正则化螺旋度分布

Fig. 10 Dimensionless turbulence dissipation rate and normalized helicity of leakage flow in cavity 3

图 11 给出了腔室 5 中心截面左、中和右 3 条特征线上泄漏流无量纲湍动能耗散率 ϵ^* 与正则化螺旋度 h_{nor} 分布,特征线位置与图 10 一致。由图 11 可知:腔室 5 中泄漏流 ϵ^* 变化规律较为单一,3 条特征线上 ϵ^* 仅存在单一峰值,右侧顺时针旋转涡旋 ($h_{\text{nor}} > 0$) 在转子剪切作用下逐步向中心处位

移,且 ϵ^* 由 1.9×10^7 降低至 0.9×10^7 ;当涡旋继续向左位移,与壁面碰撞后转为逆时针旋转 ($h_{\text{nor}} < 0$), ϵ^* 依然保持单一峰值,但最大值增大至 2.0×10^7 。因此,扇贝仿生密封腔室中涡旋的旋转、分裂和移动是影响泄漏流湍动能耗散的主要原因。

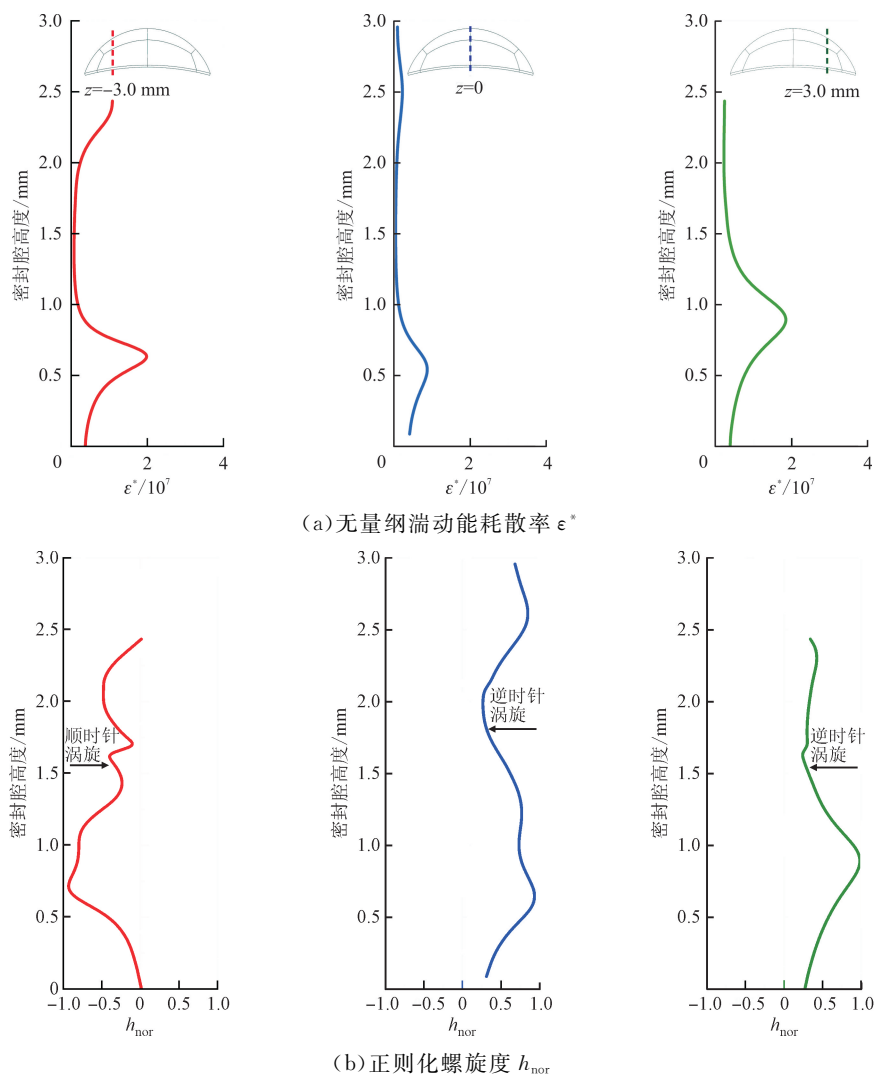


图 11 腔室 5 中泄漏流无量纲湍动能耗散率与正则化螺旋度分布

Fig. 11 Dimensionless turbulence dissipation rate and normalized helicity of leakage flow in cavity 5

3 结 论

本文提出了旋转机械强变物性真实气体流动高精度数值模拟方法,研究了扇贝仿生密封腔室内 sCO_2 泄漏流复杂流动过程,阐明了密封腔室内泄漏流涡旋分布及其对湍动能耗散的影响机理,主要获得如下结论。

(1) sCO_2 泄漏流进入密封腔室内发生膨胀且流速降低,泄漏流涡旋在转子剪切作用下存在迁移、分

裂和分离行为。

(2) 泄漏流正则化螺旋度分布表明,转子剪切作用是影响涡旋空间分布的主要因素,各腔室内涡旋存在顺时针和逆时针旋向变化,并伴随涡旋脱落和分离。

(3) 反向涡旋可增强泄漏流湍动能耗散率,改善密封封严性能,反向涡旋外缘交界点即为湍动能耗散率极值点,涡旋转向变化同样可进一步提升泄漏流的湍动能耗散率。

参考文献:

- [1] 何雅玲, 李梦杰, 郭嘉琪, 等. 二氧化碳热力循环在新型能源系统应用中的研究现状与发展趋势 [J]. 科学通报, 2025, 70(7): 872-887.
He Yaling, Li Mengjie, Guo Jiaqi, et al. Advances and development trend of carbon dioxide thermodynamic cycles applied in novel energy systems [J]. Chinese Science Bulletin, 2025, 70(7): 872-887.
- [2] 姜培学, 金红光. 面向“双碳”目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究 [J]. 科学通报, 2024, 69(34): 5007-5015.
Jiang Peixue, Jin Hongguang. A strategic study of interdisciplinary frontier in the field of energy conversion and utilization for the “dual carbon” goals [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(34): 5007-5015.
- [3] Wang Rui, Wang Xuan, Bian Xingyan, et al. An optimal split ratio in design and control of a recompression supercritical CO₂ Brayton system [J]. Energy, 2023, 277: 127676.
- [4] Zheng Nan, Li Ziyang, Fang Jiabin, et al. Supercritical CO₂ mixture Brayton cycle with floating critical points for concentrating solar power application: concept and thermodynamic analysis [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 284: 116989.
- [5] Lee W, Yoo S, Park D, et al. Design considerations of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle of small modular molten salt reactor for ship propulsion [J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 163: 104835.
- [6] Feng Jiaqi, Cui Hongbo, Zhang Enbo, et al. Variable load operation characteristics of CO₂ closed cycle system for unmanned underwater vehicle [J]. Energy, 2025, 335: 138371.
- [7] Ma Xiaofeng, Jiang Peixue, Zhu Yin Hai. Dynamic simulation and analysis of transient characteristics of a thermal-to-electrical conversion system based on supercritical CO₂ Brayton cycle in hypersonic vehicles [J]. Applied Energy, 2024, 359: 122686.
- [8] Li Yuzhe, Zhang Enbo, Feng Jiaqi, et al. Reduced-dimensional prediction method for the axial aerodynamic forces in the off-design operation of near-critical CO₂ centrifugal compressors [J]. Energy, 2024, 302: 131791.
- [9] 胡乐豪, 邓清华, 刘洲洋, 等. 超临界二氧化碳迷宫密封内摩擦损失数值研究及流动特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(3): 68-78.
Hu Lehao, Deng Qinghua, Liu Zhouyang, et al. Numerical investigation for windage loss and flow characteristics analysis with supercritical CO₂ in labyrinth seal [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(3): 68-78.
- [10] Zhang Xuan, Jiang Jinbo, Peng Xudong, et al. Leakage reduction by optimization of hole-pattern damping seal with inclined hole cavity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 169: 120924.
- [11] Wright S, Radel R, Vernon M, et al. Operation and analysis of a supercritical CO₂ Brayton cycle [EB/OL]. [2025-05-17]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1014473/m2/1/high_res_d/984129.pdf.
- [12] Wang Yize, Liu Zhenqing. A bionic design of oscillating wave surge energy converter based on scallops [J]. Energy, 2024, 304: 132236.
- [13] Wang Yumo, Pang Shunxiang, Jin Hu, et al. Development of a biomimetic scallop robot capable of jet propulsion [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2020, 15(3): 036008.
- [14] Bushuk M, Holland D, Stanton T, et al. Ice scallops: a laboratory investigation of the ice-water interface [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 873: 942-976.
- [15] Zhang Enbo, Watanebe T, Himeno T, et al. Leakage reduction mechanism of supercritical CO₂ scallop damper seal: vortex structure and turbulence dissipation [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(5): 056108.
- [16] 杨富方, 刘航滔, 杨震, 等. 超临界二氧化碳循环工质热物性研究进展 [J]. 热力发电, 2020, 49(10): 21-29.
Yang Fufang, Liu Hangtao, Yang Zhen, et al. Thermophysical properties of working fluid of supercritical carbon dioxide cycle: research progress [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(10): 21-29.
- [17] Patankar S, Spalding D. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [18] Van Doormaal J, Raithby G. Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow [J]. Numerical Heat Transfer, 1984, 7(2): 147-163.
- [19] Issa R. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting [J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1): 40-65.
- [20] Toro E. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics: a practical introduction [M]. Berlin, Germany: Springer, 2009: 265-282.
- [21] Gottlieb S, Shu Chiwang. Total variation diminishing Runge-Kutta schemes [J]. Mathematics of Computation, 1998, 67(221): 73-85.
- [22] Obayashi S, Guruswamy G. Convergence acceleration of a Navier-Stokes solver for efficient static aeroelastic computations [J]. AIAA Journal, 1995, 33(6): 1134-

- 1141.
- [23] Nan Xi, Himeno T, Watanabe T. Real gas effects on inlet boundary condition with supercritical CO₂ as the working fluid [C]//Proceedings of the Asian Congress on Gas Turbines. Seoul, Korea: Seoul National University, 2014: 1-6.
- [24] Yoon S, Jameson A. Lower-upper symmetric-Gauss-Seidel method for the Euler and Navier-Stokes equations [J]. AIAA Journal, 1988, 26(9): 1025-1026.
- [25] Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications [M]. 3rd ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2015:29-59.
- [26] Peng Dingyu, Robinson D. A new two-constant equation of state [J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1976, 15(1): 59-64.
- [27] Lemmon E, Bell I, Huber M, et al. NIST standard reference database23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 10.0, standard reference data program [EB/OL]. [2025-05-17]. <https://www.nist.gov/publications/nist-standard-reference-database-23-reference-fluid-thermodynamic-and-transport>.
- [28] 张小昆, 张海滨, 张彪, 等. 联乙酰分子荧光特性及示踪流场测速应用研究 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(9):2486-2495.
- Zhang Xiaokun, Zhang Haibin, Zhang Biao, et al. Study on the phosphorescence characteristics of diacetyl molecules and the application of molecular tagging velocimetry [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(9):2486-2495.
- [29] Wu Yiming, Zhang Enbo, Bai Bofeng. A novel optimization of blade angle distribution for supercritical CO₂ centrifugal compressor based on the artificial neural network [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 344: 120305.
- [30] Xu Hongyi, Cai Xiaoshu, Liu Chaoqun. Liutex (vortex) core definition and automatic identification for turbulence vortex structures [J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(5): 857-863.
- (编辑 武红江)