



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405553

引用格式:张方浩,李建中,巩二磊,等. 径向流内燃波转子预压缩过程数值分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(13): 5671-5680.

Zhang Fanghao, Li Jianzhong, Gong Erlei, et al. Numerical analysis of the pre-compression process in radial wave rotor combustor[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5671-5680.

径向流内燃波转子预压缩过程数值分析

张方浩, 李建中*, 巩二磊, 姚倩, 郑仁传

(南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要 为揭示径向流内燃波转子预压缩过程的非定常流动特性,通过三维非定常仿真对典型工况下复杂波系诱导预增压机制进行了模拟和分析,重点研究了进排气端口压差与波转子转速对通道内压缩波传播规律的影响。结果表明:压缩波在通道内传播时受弯曲通道曲率影响,导致波的反射、折射和衰减,发生能量损失和波形畸变,影响压缩波的传播路径与速度;高压差虽然增强了压缩波强度,但加剧了燃料的过度填充和流动不稳定性,增加了热力学损失,使等熵压缩效率显著降低;转速通过调节波转子的工作时序来影响通道内压缩波的传播特性,在 1 200 r/min 时,进气端口开启时间延长,压缩波反射形成膨胀波并逆向传播,导致通道内增压比仅为 103%,等熵压缩效率大幅度减小。

关键词 径向流内燃波转子;非定常流动;预压缩;等熵压缩效率

中图分类号 V231.3; **文献标志码** A

Numerical Analysis of the Pre-compression Process in Radial Wave Rotor Combustor

ZHANG Fang-hao, LI Jian-zhong*, GONG Er-lei, YAO Qian, ZHENG Ren-chuan

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[Abstract] In order to reveal the unsteady flow characteristics during the pre-compression process of the radial wave rotor combustor, the pre-compression mechanism induced by complex wave systems under typical operating conditions was simulated and analyzed using three-dimensional unsteady simulations. The impact of pressure differential across intake and exhaust ports, as well as rotor speed, on the propagation behavior of compression waves within the channels was focused on. The results indicate that as compression waves propagate within the channels, they are influenced by the curvature of the curved channels, leading to wave reflection, refraction, and attenuation. This results in energy loss and waveform distortion, which affect the propagation path and speed of the compression waves. Although a higher pressure difference enhances the intensity of the compression waves, it exacerbates overfilling of the fuel and flow instability, increases thermodynamic losses, and significantly reduces the isentropic compression efficiency. The rotational speed affects the propagation characteristics of compression waves within the channels by adjusting the operational timing of the wave rotor. At 1 200 r/min, the opening time of the intake port is extended, causing the compression waves to reflect and form expansion waves that propagate in the reverse direction. This results in a pressure ratio within the channel of only 103% and a substantial decrease in isentropic compression efficiency.

[Keywords] radial wave rotor combustor; unsteady flow; pre-compression; isentropic compression efficiency

现有能源体系主要依赖于低效的化石燃料燃烧,以基于布雷顿循环的地面发电系统及飞行器推进系统中的燃气轮机为例,其平均热效率仅约 40%^[1]。因此,迫切需要针对发动机和燃烧室方面进行技术革新,开发高推重比、低油耗的先进燃烧推进技术,以实现能源的高效利用^[2-3]。传统布雷顿循环热效率的提升主要通过提高压气机压比、涡轮入口温度以及旋转部件的气动效率实现,但由于材料耐受温度以及压气机压比的限制,难以实现燃

气轮机热效率的实质性提高^[4-6]。

内燃波转子(wave rotor combustor, WRC)^[7-9]是一种非定常燃烧装置,通过增加低能流体的温度和压力,进行增压燃烧,提高燃气涡轮发动机的循环效率。通过理论计算^[10]表明在相同的基准压比和涡轮入口状态下,考虑损失时径向流内燃波转子循环相较于基准机的热循环效率能够增加 44.9%,耗油率降低 30.9%。内燃波转子按照气流流动方向可以分为径向流内燃波转子与轴向流内燃波转

收稿日期:2024-07-24 修订日期:2025-02-10

基金项目:国防科技基础研究项目(1002TJA22010);江苏省自然科学基金(BK20210278)

第一作者:张方浩(2000—),男,汉族,河南信阳人,硕士研究生。研究方向:内燃波转子增压燃烧技术。E-mail:zfh1301@163.com。

*通信作者:李建中(1979—),男,汉族,江苏南京人,博士,教授。研究方向:航空发动机前沿燃烧技术。E-mail:ljz0629@nuaa.edu.cn。

子^[11], 径向流内燃波转子的通道内气流沿径向流动, 在结构上更加紧凑, 具有减小空间、质量和制造成本的优点^[12-13]。相关研究指出, 燃烧室长度缩短 2.5 mm 可使航空发动机重量减轻 0.4%^[14]。因此, 具有更紧凑结构的径向流内燃波转子在航空领域作为新的推进技术具有显著优势。但在径向流内燃波转子工作过程中, 通道通过高速旋转周期性地连接进排气端口, 实现燃料的填充、点火、燃烧及排放过程, 由此产生的内部流动极为复杂, 表现出显著的非定常特性。因此掌握各因素对非定常流动特性的影响规律, 对径向流内燃波转子性能优化和工程应用均十分重要。

国内外学者优化了径向流内燃波转子通道结构, 通过数值模拟与实验研究探究了不同工况下波转子内部流动模式与工作过程。Iancu 等^[15]通过数值模拟发现径向波转子具有利用离心力改善混气填充和扫气过程的优点。Prashad^[16]和 Sun^[17]通过数值模拟对比 3 种不同结构波转子通道的输出功率与预增压大小, 发现出口收敛通道是最佳结构。产世宁等^[18]通过数值模拟研究了不同几何通道对切向驱动力的影响, 结果发现弯曲通道会造成激波/膨胀波在传播中, 波面出现倾斜, 导致通道上下壁面存在压差, 驱动了波转子自旋。Kurec 等^[19]通过数值模拟对径向流内燃波转子不同转速下的膨胀过程进行了模拟, 发现高转速会获得较高的扭矩。巩二磊^[20]、Zheng 等^[21]通过数值模拟研究了转速变化对轴向流内燃波转子的影响, 结果表明转速为 2 000 r/min 时可以达到最佳预增压效果。在实验研究方面, Akbari 等^[22]采用固定燃烧通道与旋转阀耦合, 建立了简化旋转阀式径向流内燃波转子实验系统, 通过阀门的快速开关引起通道内产生压缩波和膨胀波, 在燃烧过程中产生压力增益。在此基础上 Parraga-Ramirez 等^[23]设计了通道旋转的径向流内燃波转子发动机, 并对燃烧过程进行了光学观测, 结果表明波转子内部预混火焰传播速度会随着波转子通道转速的增大而增大, 燃烧点火工作边界随着转速的升高而变窄。

综上所述, 目前对径向流内燃波转子非定常流动特性的研究, 主要集中在增压效果、扭矩输出等宏观性能评估, 而缺乏对通道内部复杂波系的形成机制与传播规律的深入分析。现聚焦于径向流内燃波转子的预压缩过程, 系统分析通道内复杂波系运动诱导的预增压机制, 揭示不同边界条件(如进排气端口压差、通道转速)对压缩波传播及预增压机制的影响规律。以期优化波转子设计、提升性能提供理论依据和关键参数指导。

1 径向流内燃波转子工作原理及数值模型建立

1.1 工作过程理想波系图

在径向流内燃波转子的运行过程中, 转子通道与进排气端口的周期性接触产生了包括压缩波、膨胀波等在内的一系列复杂波系。图 1 展示了工作过程中理想的波系结构^[24], 混合气体自进气端口涌入并有效填充波转子通道, 在通道内形成清晰的物质间断面, 直至排气端口关闭。此状态下, 气流撞击排气端口端壁产生预压缩波, 对通道内气体进行冷态预压缩, 提高了热力循环的初始压力, 从而增强整体热效率。随后, 进气端口关闭, 在通道中间位置点火, 进行定容燃烧。燃烧结束后, 随着波转子通道的旋转, 高温高压的燃烧产物移动至排气端口区域产生膨胀波, 通过排气端口排出, 并自然过渡到下一个循环的起始阶段。

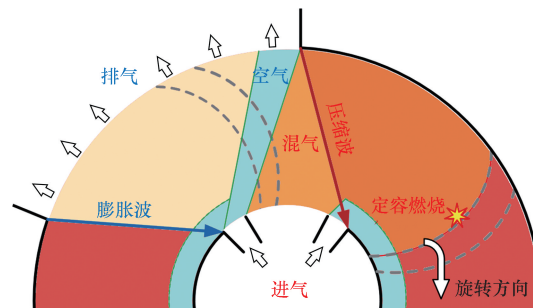


图 1 径向流内燃波转子工作过程理想波系图
Fig. 1 Ideal wave system diagram of the working process of radial wave rotor combustor

1.2 计算模型及数值方法

根据理想波系图, 构建的径向流内燃波转子三维简化计算模型如图 2 所示, 该模型主要包括从内向外沿径向布置的一组对称的进气与排气端口以及旋转的全环波转子通道。为优化进气与排气过程, 波转子通道设计融合了偏转角为 43.5°的弯曲段和径向长度为 35 mm 的相切平直段, 当进气气流沿弯曲段以切向方式进入, 能够有效减缓进气填充速度, 从而抑制燃料的过度填充现象。随后, 气流平滑过渡至平直段, 确保所有通道在排气阶段能够保持一致的排气方向, 进而促进了系统的整体协调性与效率。进气端口由 3 个端口组成, 中间进气端口进燃料(乙烯)与空气的混气(当量比为 1), 两边端口进空气, 具有扫气与预增压作用, 通道旋转一周进行两次进排气循环, 具体结构参数如表 1 与表 2 所示。在监测通道内沿径向设置 5 个监测面(S1: $R = 45$ mm, S2: $R = 70$ mm, S3: $R = 95$ mm, S4: $R = 120$ mm, S5: $R = 145$ mm, 其中 R 为半径)。由于计

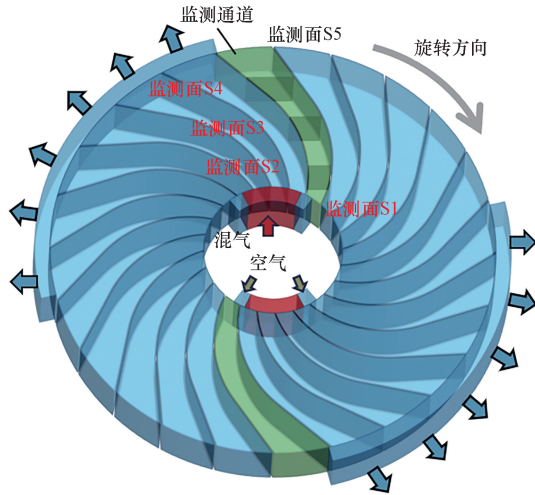


图2 径向流内燃波转子的三维计算模型及监测通道设置
Fig. 2 Three-dimensional computational model and monitoring channel setup of radial wave rotor combustor

表1 径向流内燃波转子通道尺寸参数
Table 1 Channel size parameters of radial wave rotor combustor

通道高度/ mm	通道径向 长度/mm	通道入口 半径/mm	通道出口 半径/mm	通道数/ 个
42	100	45	145	24

表2 径向流内燃波转子端口位置分布参数
Table 2 Port position distribution parameters of radial wave rotor combustor

进排气端 口相位差/ (°)	排气端口 总开度/ (°)	扫气端口 角度/ (°)	进气端口 总开度/ (°)	混气端口 角度/ (°)	叶片偏 转角/ (°)
65.4	88.5	12	73.5	60.1	43.5

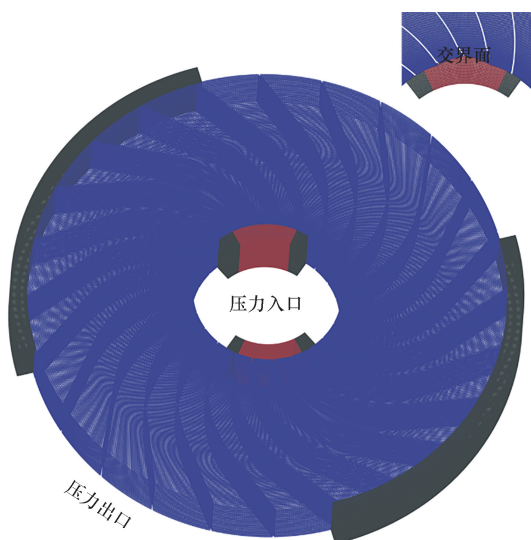


图3 计算模型三维网格示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the three-dimensional mesh of the computational model

算模型形状规则, 整个计算域采用结构化网格, 如图3所示。最小网格尺寸选取 1.0 mm, 总网格数约 350 万。

基于雷诺时均的三维瞬态 Navier-Stokes 方程求解, 湍流模型采用 shear-stress-transport (SST) $k-\omega$ 模型, 该模型由于结合了 $k-\omega$ 和 $k-\varepsilon$ 模型的优点, 在处理复杂流动 (如分离流、附面层和涡流) 时具有较高的精确性。方程的迭代采用针对非定常问题具有较高精度的二阶压力-隐式分裂算子 (pressure-implicit with splitting of operators, PISO), 方程的离散项均采用二阶迎风插分格式。计算模型的流体定义为理想气体, 入口和出口的边界条件分别定义为压力入口和压力出口, 壁面设置为无滑移绝热壁面。

1.3 性能评价指标

1.3.1 冷态预增压性能

在径向流内燃波转子的进排气端口关闭后, 通道内的压力逐渐趋于稳定。此时, 通道内压力与进气压力的差值表示了预增压 p_{Δ} 的大小。此外, 预增压的相对大小可通过增压比 π 来量化, 定义为通道内压力与进气压力之比。

$$p_{\Delta} = p_h - p_0 \quad (1)$$

$$\pi = \frac{p_h}{p_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: p_h 为进排气端口都关闭后, 通道内压力趋于稳定的值, kPa; p_0 为进气压力, kPa。

1.3.2 压缩效率

等熵压缩效率 η 定义为实际压缩过程所需的功与等熵 (理想) 压缩过程所需功的比值, 用于评估径向流内燃波转子在预压缩过程中的压缩性能。高等熵压缩效率表明径向流内燃波转子在预压缩过程中更接近理想的等熵压缩, 从而实现较低的能量损失。

$$\eta = \frac{\Delta h_{id}}{\Delta h_{re}} = \frac{c_p (T_h^s - T_0)}{c_p T_h - T_0} = \frac{T_h^s - T_0}{T_h - T_0} \quad (3)$$

等熵压缩过程, 温度与压力的关系表示为

$$\frac{T_h^s}{T_0} = \left(\frac{p_h}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \pi^{\frac{k-1}{k}} \quad (4)$$

则等熵压缩效率的计算公式表示为

$$\eta = \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\frac{T_h}{T_0} - 1} \quad (5)$$

式中: Δh_{re} 、 Δh_{id} 为径向流内燃波转子预压缩过程的实际比焓变化、等熵过程比焓变化, J/kg; c_p 为定压比热容, J/(kg·K); T_h 为进排气端口都关闭后, 通道内温度趋于稳定的值, K; T_0 为进气温度, K; T_h^s 为相同压力下等熵压缩温度, K; k 为气体的绝热指数。

图7展示了数值模拟得到的测点P9的压力变化与东京大学的实验结果对比。数值计算与实验结果在整体变化趋势上基本一致,但计算得到的峰值压力略高,相对误差为3.85%。由于实验过程中单点的压力大小受波转子端口渐开闭特性的影响较大,而且模拟中采用的绝热光滑壁面和黏性损失参数与实际实验环境存在差异。这些因素说明了计算值与实验值之间的偏差是合理的,从而验证了该数值方法在计算波转子通道内压力波形成与传播的可靠性。

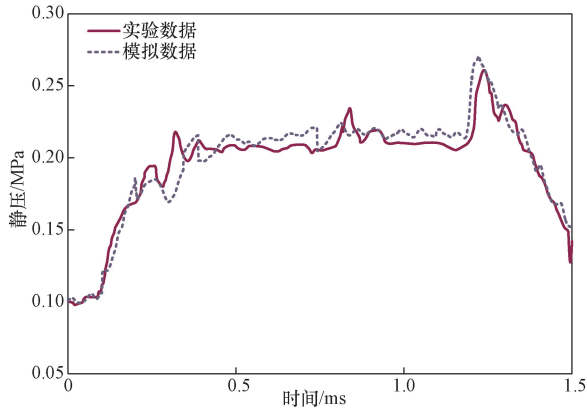


图7 P9测点数值计算与实验结果压力对比

Fig. 7 Pressure comparison between numerical calculations and experimental results at measurement point P9

3 结果与讨论

3.1 压缩波的生成与传播

径向流内燃波转子通道内不稳定波的产生对波转子的非定常流动特性有重要影响,为了明晰预压缩过程中这些复杂波系的产生和传播机制,在进气压力为3 atm、通道转速为4 000 r/min、进出口温度均为420 K的边界条件下进行了数值计算,并对5个监测平面的压力和温度进行监测,图8展示了各平面压力和温度随时间的变化曲线。可以看到,各监测面上的压力与温度变化趋势基本一致,呈现周期性变化,这是由于压缩波在封闭通道内的往返运动,导致温度与压力的急剧变化。在流体动力学中,压力波引起的压力变化通常在较短距离内迅速发生,形成显著的梯度或跳跃。为了确定通道中波的位置,对各监测面上的压力变化曲线进行微分处理,将区域内压力变化速率的极值定义为压力波的位置。

压缩波波在通道中传播的压力云图如图9所示,在 $t = 1.86$ ms时,排气端口突然关闭,气流撞击排气端口端壁产生向通道进气端传播的强压缩波,而在进气端气流进入弯曲通道时,由于气流受到离心力的作用,在弯曲段的外侧加速,而内侧减速,从而在内侧形成低压区,并且随着通道的旋转,气流进

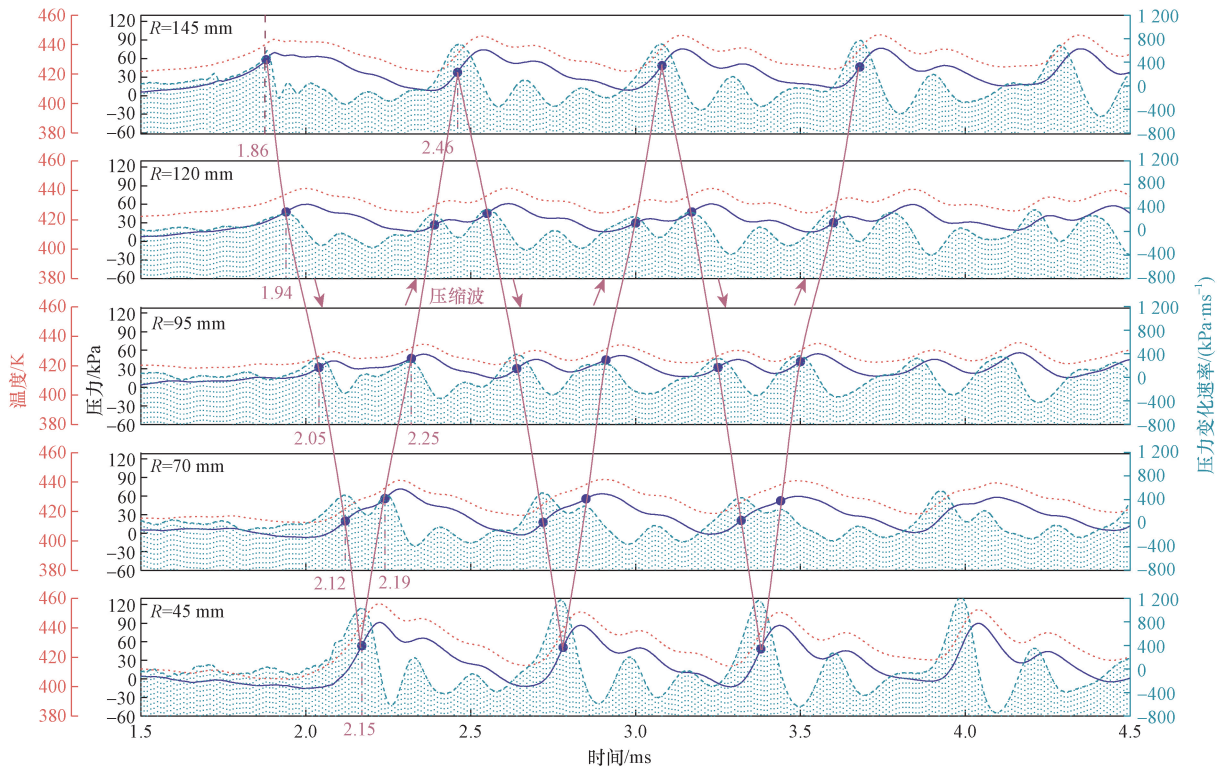


图8 监测平面压力与温度随时间变化曲线

Fig. 8 Temporal variation curves of pressure and temperature in the monitoring plane

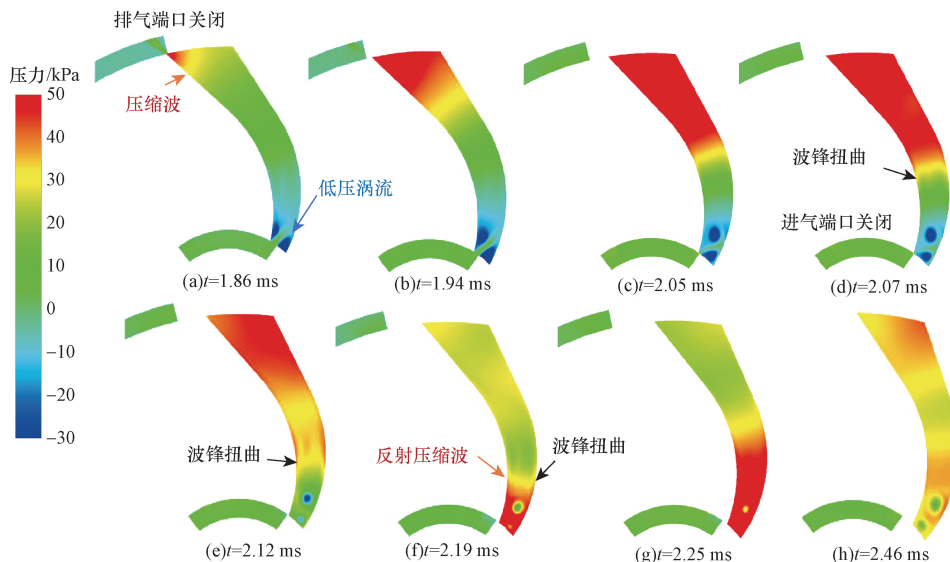


图9 监测通道内压力随时间变化云图

Fig. 9 Pressure contour map over time in the monitoring channel

入通道的流通面积不断减小,导致气流速度增大在壁面附近形成附面层,并发生分离产生低压涡流,而且随着进气端口的逐渐关闭,低压涡流面积不断增大。在 $t = 2.07$ ms 时刻压缩波由平直段传播到弯曲段。在平直段中,压缩波波锋保持平整,但进入弯曲通道后,通道的几何形状改变,弯曲通道的曲率会导致波锋不同位置的传播速度不一致,外侧的波锋需要传播更长的距离,而内侧的波锋传播距离较短,从而导致波锋形状发生扭曲。在 $t = 2.15$ ms 时刻,压缩波经进气端口端壁反射后向通道末端传播,在 $R = 95$ mm 处分别在 $t = 2.05$ ms 与 $t = 2.25$ ms 处经历两次压力上升,经壁面反射过后,压缩波的部分能量转换为热能,致使反射后压缩波强度降低,导致 $t = 2.25$ ms 处的压力变化速率要小于 $t = 2.13$ ms 处的压力变化速率。在 $t = 1.86 \sim 2.46$ ms 的时间段内,压缩波在弯曲通道内往返传播一次,但在传播过程中各个位置的温度与压缩波压力变化速率并不相同。这是由于径向流内燃波转子弯曲通道的几何形状会导致波的反射、折射和衰减,发生能量的损失和波形的畸变,从而影响压缩波的传播路径和速度。

为优化径向流内燃波转子的设计,必须考虑预压缩过程中压缩波的传播过程与工作时序的匹配。在 $t = 2.07$ ms 时,进气端口完全关闭,此时压缩波尚未传播至进气端,避免了压力边界反射引起的通道内压力耗散,确保了压缩波在通道内的有效传播,减少了能量损失,提高了波转子的整体效率。

3.2 进排气端口压差对预压缩过程的影响

为探讨径向流内燃波转子系统中,进排气端口压差对增压性能及混气填充效率的影响,保持径向流内燃波转子进气压力恒定为 3 atm,同时固定波转子

转速为 4 000 r/min,径向内燃波转子进排气端口压差 Δp 分别为 0.1、0.12、0.14、0.16 atm,其他边界条件均保持恒定。

随着进排气端口压差的增大,通道内混气的填充速度也会增大,这会导致气流通过波转子的流动阻力增加,从而引起能量损失。同时,高速填充会导致流动不稳定性增加,产生涡流和湍流,对波转子的运行效能与可靠性构成了不利影响。湍流耗散率是描述湍流运动中能量耗散速率的物理量,反映了流体内部能量转换和耗散的流动特性。湍流耗散通常由流动不稳定性和涡耗散引起,不同进排气端口压差条件下通道内的湍流耗散率如图 10 所示,可以看出,湍流耗散主要存在于通道进气区域,并随着压差的增大,湍流脉动面积也不断增大。在混气填充速度增大的过程中,气流撞击排气端口端壁,导致滞止效应显著增强,从而引发压缩波强度的进一步提高。不同压差下监测通道内的增压性能及压缩效率对比如图 11 所示,观察不同压差工况下的增压比,依次呈现为 106.8%、107.15%、107.65%、107.76% 的递增趋势。然而,值得注意的是,在高压差条件下,湍流耗散率的显著增大加剧了流动阻力和摩擦损失,这一效应限制了增压比的增长速率,使其增幅逐渐减小。此外,高压差下流动不稳定引起的涡流和湍流增加,导致热力学损失增加,因此径向波转子的等熵压缩效率随着进排气端口压差的增大而不断减小。

压差是驱动气流进入波转子的主要动力,当压差增大时,气流受到的驱动力增加,从而加快了进气速度,导致进气流量增大。图 12 为不同压差下监测通道内的燃料质量及燃料填充率对比,高速旋转

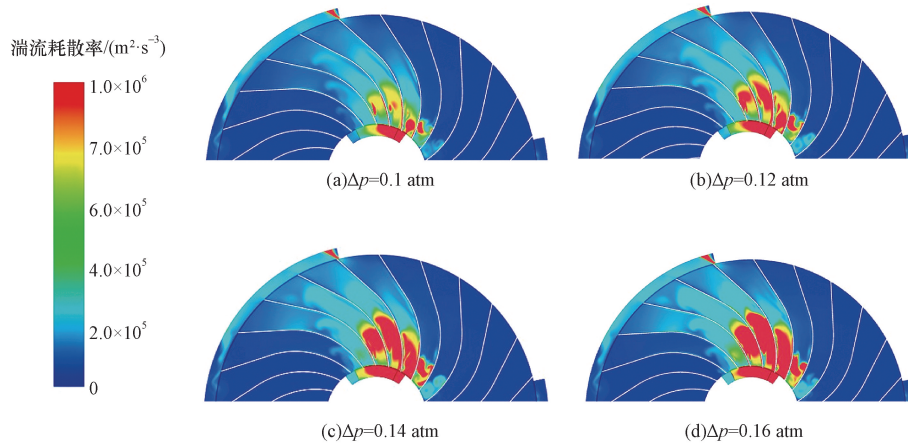


图 10 不同压差下通道内湍流耗散率对比

Fig. 10 Comparison of turbulent dissipation rates within the channel under different pressure differences

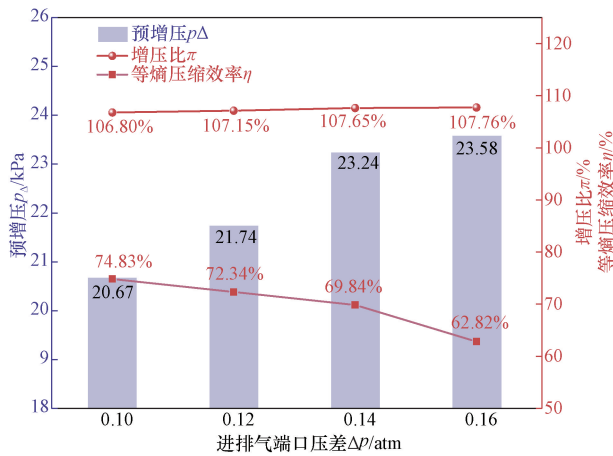


图 11 不同压差下监测通道内的增压性能及压缩效率对比

Fig. 11 Comparison of supercharging performance and compression efficiency within the monitoring channel under different pressure differences

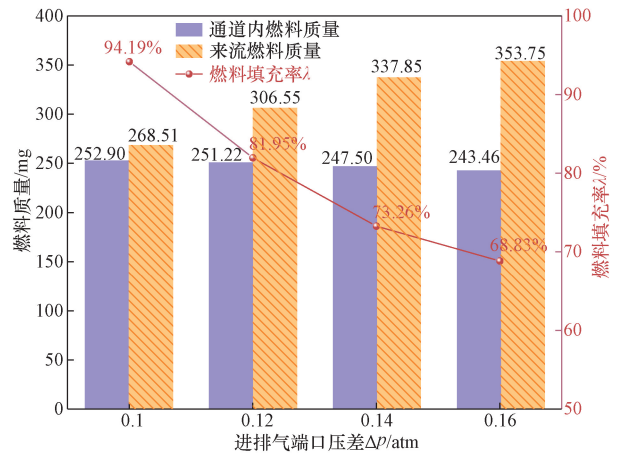


图 12 不同压差下监测通道内的燃料质量及燃料填充率对比

Fig. 12 Comparison of fuel mass and fuel fill ratio within the monitoring channel under different differences

的径向波转子通道在离心力与压差的双重作用下, 混气受到径向向外的推力, 而由于径向流内燃波转子进排气端口开闭并不是瞬时完成的, 在混气进入通道的过程中通道仍会与排气端口相连接, 若混气填充速度过大使得混气进入排气端口而造成过度填充。因此随着进排气端口压差的增大径向波转子通道内燃料填充质量不断减小, 燃料填充率呈下降趋势。

3.3 通道转速对预压缩过程的影响

调整内燃波转子的转速, 将会改变转子通道的旋转周期和通道内气体所受离心力大小, 进而影响径向流内燃波转子的工作时序, 对通道内的燃料填充与预增压效果具有很大影响。在研究中, 通过固定径向波转子进排气端口压差为 0.12 atm, 转速 n 由 4 000 r/min 变化至 5 000、3 000、2 400、1 200 r/min, 其余各边界条件均保持不变。

图 13 展示了排气端口关闭条件时, 不同工况下通道内部压力分布的云图。定义 40 kPa 等值面为压缩波波锋位置, 以此分析压缩波传播过程。随着转速的降低, 通道内压缩波波锋出现扭曲, 这是由于低速条件下边界层厚度的相对增加, 边界层内的速度梯度与黏性效应增强, 压缩波的传播受到更大的阻力, 导致波锋形状发生扭曲。图 14 为不同转速下, 通道内平均压力随周期变化曲线。鉴于径向波转子转速的变化直接影响通道的旋转周期, 选取各转速下同一相对位置(即通道相对于进排气端口位置一致)的周期点进行分析。结果表明, 在排气端口关闭后, 各工况下的压力均呈现一致的上升趋势。特别地, 在转速为 1 200 r/min 的工况下, 压缩波在 $t = 0.13T$ 时刻传播至进气端, 导致整个通道经历压缩波作用后压力达到峰值。然而, 此时进气端口仍处于开启状态, 压缩波在经进气端压力边界反射

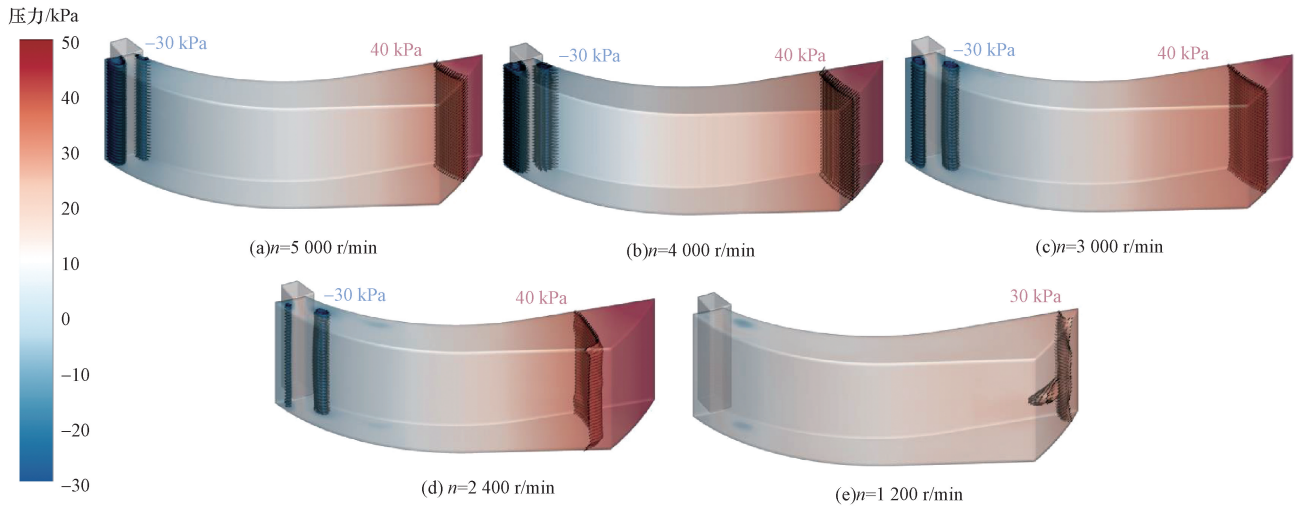


图 13 不同转速下监测通道内压力云图对比

Fig. 13 Comparison of pressure contour maps within the monitoring channel at different rotational speeds

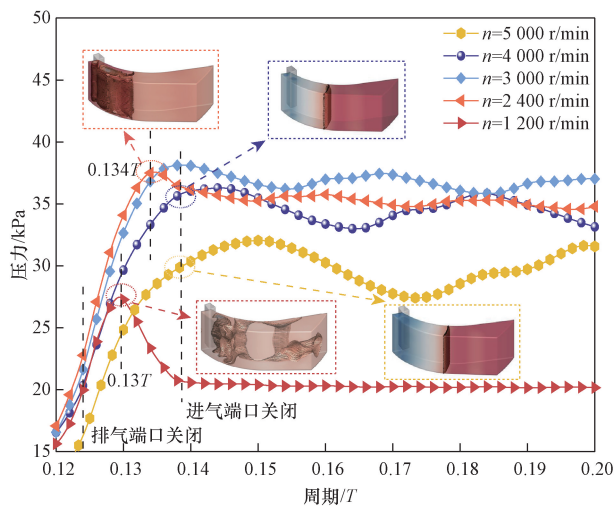


图 14 不同转速下监测通道内压力随时间变化曲线

Fig. 14 Temporal variation curves of pressure within the monitoring channel at different rotational speeds

产生膨胀波并逆向传播,显著降低了通道内的整体压力,直至进气端口完全关闭,通道内压力趋于稳定状态。类似地,在 2 400 r/min 的转速工况下,通道内展现出相似的压力变化过程,尽管转速增加导致时间节点略有偏移,但压缩波传播至进气端后引发的压力峰值、膨胀波生成以及最终压力趋于稳定的过程,均与前述 1 200 r/min 工况下的现象相吻合。在 $t = 0.138T$ 时进气端口关闭,在高转速下 (4 000 r/min 和 5 000 r/min),由于此时压缩波位于通道弯曲段,未充分传播整个通道并施加其增压效应于所有区域,通道内压力并未达到峰值状态。径向波转子增压比与等熵压缩效率随转速变化呈现显著的非线性特征,具体表现为先递增后递减的趋势,如图 15 所示。在恒定进排气端口压差的条件下,低转速区间内转速的提升,使压缩波传播至进

气端口的时间节点向后偏移,减少了通道内压力的耗散,进而增强了预增压效果。然而,随着转速的进一步增加,进气端口的关闭速率亦随之加快,这一效应迅速减小了进气流通的有效截面积,促使进气端气流速度急剧攀升,强化了低压涡流的生成与演化过程,产生额外的能量损失和摩擦损耗,导致增压比和等熵压缩效率下降。

随着径向波转子转速的降低,通道的旋转周期相应延长,进而增加了进气时间,因此一个周期内燃料的来流质量显著增加如图 16 所示。然而,随着转速的降低,通道内混气所受的离心力作用减弱,周向速度相对于径向速度减小,导致压差在气流流动中占据主导地位,促使燃料主要分布在外壁面,加剧了燃料的过度填充,使得通道内燃料质量呈下降趋势,因此通道内燃料填充率随着转速的减小不断降低。

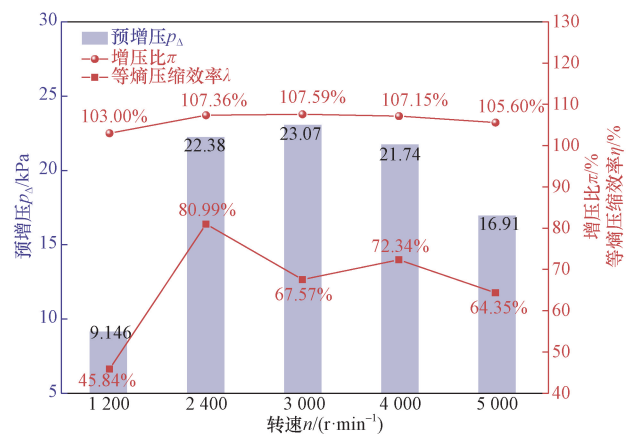


图 15 不同转速下监测通道内的增压性能及压缩效率对比

Fig. 15 Comparison of supercharging performance and compression efficiency within the monitoring channel at different rotational speeds

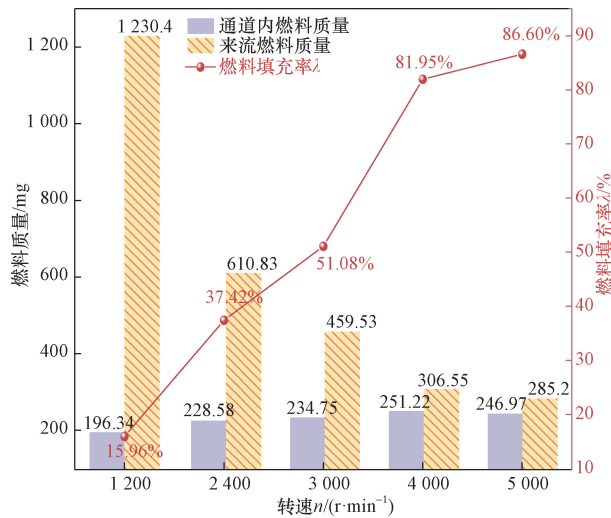


图 16 不同转速下通道内的燃料质量及燃料填充率对比
Fig. 16 Comparison of fuel mass and fuel fill ratio within the monitoring channel at different rotational speeds

4 结论

通过建立三维简化的径向流内燃波转子数值模型,分析了预压缩过程中通道内压缩波的产生与传播机制。引入了燃料填充率、增压比等量化评估指标,研究了进排气端口压差和通道转速等边界条件变化对通道内压缩波传播规律的影响,得出了以下结论。

(1) 径向流内燃波转子的弯曲通道对压缩波传播具有较大影响,使波在传播过程中发生反射、折射和衰减,进而影响压缩波的传播路径和速度,导致通道内压力变化速率在时间和空间上的分布不均匀。

(2) 进排气压差增大虽然增强了通道内的压缩波强度,但加剧了燃料的过度填充和流动不稳定性,增加了热力学损失,使波转子等熵压缩效率大幅度减小。

(3) 转速通过调节径向流波转子的工作时序来影响压缩波的传播特性。各转速工况下,通道内压力均呈现上升趋势,在压缩波到达进气端时达到峰值,并在进气端口关闭后趋于稳定。但在 1 200 r/min 时,因进气端口开启时间延长,压缩波反射形成膨胀波并逆向传播,消耗了压力增益。

(4) 在通过调节转速优化波转子性能时,需要平衡增压性能与能量损失之间的关系。随着转速的提升,通道内的燃料填充率逐渐增大,等熵压缩效率和增压比均呈现先增加后减少的趋势。综合比较表明,在转速为 4 000 r/min 的工况下,波转子的整体性能达到最佳。

参 考 文 献

- [1] 黄勇. 燃烧与燃烧室[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
Huang Yong. Combustion and combustion chambers[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008.
- [2] Akbari P, Tait C J. Development and initial testing of a radial wave engine; ASME GT2019-90608[R]. Phoenix; ASME, 2019.
- [3] 于女, 崔宇, 曾若鸣, 等. 航空污染的产生和控制机制研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14090-14099.
Yu Nü, Cui Yu, Zeng Ruoming, et al. Review on generation and control mechanism of aviation pollution[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(32): 14090-14099.
- [4] Akbari P, Nalim R, Mueller N. A review of wave rotor technology and its applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(4): 717-735.
- [5] 李苏辉, 张归华, 吴玉新. 面向未来燃气轮机的先进燃烧技术综述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(12): 1423-1437.
Li Suhui, Zhang Guihua, Wu Yuxin. Review of advanced combustion technologies for future gas turbines[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(12): 1423-1437.
- [6] 李连波, 陈雄, 周长省, 等. 旋转爆震发动机与涡轮机的集成[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10551-10556.
Li Lianbo, Chen Xiong, Zhou Changsheng, et al. Integration of rotating detonation engine with turbine[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10551-10556.
- [7] Akbari P, Nalim M R. Review of recent developments in wave rotor combustion technology[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(4): 833-844.
- [8] 成本林, 李建中, 巩二磊, 等. 内燃波转子影响涡轴发动机性能研究[J]. 推进技术, 2012, 33(5): 726-731.
Cheng Benlin, Li Jianzhong, Gong Erlei, et al. Research on the influence of internal combustion wave rotor on the performance of turbo-axial engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(5): 726-731.
- [9] 李建中, 巩二磊, 温泉, 等. 内燃波转子技术对燃气涡轮发动机性能影响[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1928-1934.
Li Jianzhong, Gong Erlei, Wen Quan, et al. Influence of internal combustion wave rotor technology on the performance of gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1928-1934.
- [10] 郑仁传, 巩二磊, 李建中, 等. 基于功比例因子的径向流内燃波转子发动机热力循环分析[J]. 推进技术, 2024, 45(9): 57-64.
Zheng Renchuan, Gong Erlei, Li Jianzhong, et al. Thermodynamic cycle analysis of a radial flow internal combustion wave rotor engine based on work ratio factor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(9): 57-64.
- [11] Sun G W, Akbari P, Gower B, et al. Thermodynamics of the wave disk engine; AIAA-2012-3704[R]. Atlanta: AIAA, 2012.
- [12] Akbari P, Agoos I. Two-stage wave disk engine concept and performance prediction[J]. SAE Technical Paper, 2017(1): 20-32.
- [13] Parraga-Ramirez P, Vagani M, Tarkleson E, et al. Development of a wave disk engine experimental facility[C]//48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlan-

- ta Georgia; Michigan State University, 2012.
- [14] Blunck D, Shouse D, Neuroth. et al. Experimental and computational studies of an ultra-compact combustor [C]//International Gas Turbine Institute. San Antonio: Air Force Research Laboratory, 2013(6): 1-13.
- [15] Iancu F, Piechna J, Mueller N. Radial ultra-micro wave rotors (RUWR): design and simulation; ASME IMECE2006-13721 [R]. Chicago: ASME, 2006.
- [16] Prashad D. Development of methodology for designing wave disk engine based on wave dynamics and thermodynamic analysis[D]. Michigan State: Michigan State University, 2014.
- [17] Sun G W. Numerical study of the aerodynamic characteristics of a wave disc engine[D]. Michigan State: Michigan State University, 2012.
- [18] 产世宁, 陈叶宇, 李凤超, 等. 波转子的驱动力形成机理数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(3): 725-732.
Chan Shining, Chen Yeyu, Li Fengchao, et al. Numerical investigation on mechanisms of driving force in wave rotors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(3): 725-732.
- [19] Kurec K, Piechna J, Müller N. Numerical investigation of the radial disk internal combustion engine[J]. Power MEMS, 2009, 4(1): 554-557.
- [20] 巩二磊. 内燃波转子工作过程及燃烧特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Gong Erlei. Research on the working process and combustion characteristics of internal combustion wave rotor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [21] Zheng R, Li J, Gong E, et al. Numerical investigation of the unsteady flow and wave dynamics in a wave rotor combustor[J]. Shock Waves, 2024, 3(34): 257-271.
- [22] Akbari P, Brady G M, Sell B C, et al. Experimental investigation of a radial wave engine utilizing a rotary valved pressure gain combustor; ASME-041027-7[R]. Chicago: ASME, 2021.
- [23] Parraga-Ramirez P F. Practical power and combustion investigations on first wave disk engine prototypes[D]. Michigan: Michigan State University, 2013.
- [24] 郑仁传, 聂赵龙, 李建中, 等. 内燃波转子增压燃烧发动机技术分析[J]. 航空动力, 2024(2): 33-36.
Zheng Renchuan, Nie Zhaolong, Li Jianzhong, et al. Technical analysis of a turbocharged combustion engine with internal combustion wave rotor[J]. Aerospace Power, 2024(2): 33-36.
- [25] Okamoto K, Nagashima T. Visualization of wave rotor inner flow dynamics[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2): 292-300.