

气波引射前向流道波转子设计及性能研究

李忠辉, 赵一鸣, 纪雅文, 胡大鹏*

(大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 首先通过理论分析,依据波转子与气流间相对运动关系,采用流道进出口倾角正切值等于该位置气流轴向速度与转子转动线速度比值的方法设计一种前向流道波转子结构,然后利用 ANSYS Fluent 软件进行数值模拟,发现当倾角满足上述正切关系时,引射过程中波转子内部及端口处流动分离和旋涡现象明显减少,流动损失降低,设备引射性能最优。最后,与直通道波转子进行对比实验研究,结果表明:各工况下前向流道波转子引射率和等熵效率与直通道波转子相比均有明显提升,且在倾角设计工况附近,设备引射性能及提升幅度达到峰值,引射率和等熵效率增幅比例均达 40%,证明依据上述理论方法设计的前向流道波转子结构合理。

关键词: 引射器;波转子;前向流道;优化设计;数值模拟;实验验证

中图分类号: TQ051.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb202006004

0 引言

天然气开采过程中,各气井地质储藏条件和开发程度不同导致井内压力存在差异^[1-2]。因此在集输压力固定^[3]的情况下,为保证开采及输气稳定,工程中通常利用高压气井压力能对低压气井实现增压开采^[4-5],从而延长低压气井生命周期,提升能量及资源利用率。而气波引射技术作为一种新型压力交换方式^[6-8],凭借其转速低、结构简单、可带液运行、效率高等特点^[9-10],有望代替涡轮以及静态引射器,在增压开采领域得到广泛的应用。目前,胡大鹏等已针对直通道波转子气波引射机理进行大量研究,初步验证结构的可行性,并得到不同操作及结构参数对性能的影响规律^[11-15]。

通过对波转子内气体流动规律研究发现,引射过程中,直通道波转子流道壁面与气流之间存在明显相互作用力,导致进出口处产生旋涡和流动分离现象^[16-18],对设备性能带来不利影响。因此本文提出一种前向流道波转子结构,通过理论分析及数值计算确定流道形式、转子转速、气流运动之间的匹配关系,得到流道最优倾角的设计方法,最后进行实验确定不同工况下前向流道波转子引

射性能变化规律,并与直通道波转子实验数据对比,证明结构的合理性。

1 前向流道波转子引射理论及倾角设计

1.1 前向流道波转子理想波图构建

为实现气波引射增压,波转子内需形成合理运动波系^[19-21],依据气体动力学原理和直通道波转子设计经验,将转子三维运动转化为流道二维平动,得到如图 1 所示的前向流道波转子理想波图。其中流道通过与各压力端口的接通、闭合产生压缩波 C_1 、 C_2 、 C_3 和膨胀波 E_1 、 E_2 、 E_3 并周期性重复此过程,从而实现高压气体对低压气体的气波引射增压过程。

1.2 前向流道倾角设计

根据波转子内气流运动规律,气体轴向射入后,由于压力波作用而逐渐加速,因此为使其与匀速转动转子间相互作用力最小,流道形式应采用后弯式,且后弯倾角沿轴向逐渐增大,进而形成一种前向流道结构。基于上述分析,综合考虑设计加工难度和对性能的影响程度,确定将进出口倾角

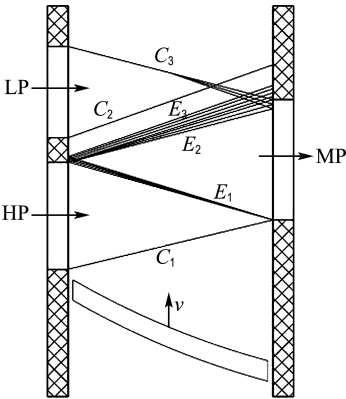


图 1 气波引射波图

Fig. 1 The wave diagram of gas wave ejection

θ_i 和 θ_o 作为核心参数,其定义为相应位置流道切线与端面所夹锐角值.基于控制变量思想,忽略中间段倾角变化带来的影响,统一采用圆弧形式过渡,得到前向流道倾角理想匹配关系如图 2 所示,其中 LP、HP、MP 分别为低压、高压气体进口和中压气体出口.

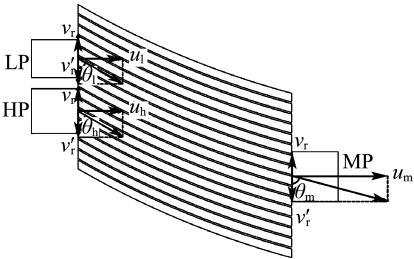


图 2 倾角与转速最优匹配

Fig. 2 The optimal matching of inclination angles and rotational speed

流道与端口相对速度大小和转子转速相等,方向相反,其计算公式为

$$v_r' = -v_r = -\omega_r \times \frac{d}{2} \tag{1}$$

根据一维非定常等熵流动及简单波理论计算出气流轴向速度^[22-23],按图 2 所示矢量三角形,计算得到各端口附近流道最优倾角:

$$\tan \theta_h = \frac{u_h}{|v_r'|} \tag{2}$$

$$\tan \theta_l = \frac{u_l}{|v_r'|} \tag{3}$$

$$\tan \theta_m = \frac{u_m}{|v_r'|} \tag{4}$$

式中: ω_r 为转子角速度,rad/s; d 为转子中径,m; v_r 为转子线速度,m/s; v_r' 为流道与端口相对速

度,m/s; u_h 、 u_m 、 u_l 为高、中、低压端口处气流轴向速度,m/s; θ_h 、 θ_m 、 θ_l 为高、中、低压端口处最优倾角,rad.

按上述方法,针对表 1 所示工况及结构参数,计算得到高、中、低压端口最优倾角 θ_h 、 θ_m 、 θ_l 分别为 57.9°、74.6°、63.9°.综合考虑设计加工难度,适当圆整后得到此工况下前向流道波转子进出口理论设计倾角 θ_i 和 θ_o 分别为 60°和 75°.

表 1 气波引射器典型工况及结构参数

Tab.1 Typical operating and structure parameters of gas wave ejector

高压端口压力	高压端口温度	中压端口压力	中压端口温度	
p_h/MPa	T_h/K	p_m/MPa	T_m/K	
0.152	293	0.12	293	

低压端口压力	低压端口温度	通道长度	转子中径	转子角速度
p_l/MPa	T_l/K	L/m	d/m	$\omega_r/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
0.101 325	293	0.25	0.256	288.75

2 数值模拟及流场分析

2.1 计算模型及数值方法

依据理想波图,为直观研究气波引射过程中各端口及波转子内部气流运动状态,验证结构合理性,在综合考虑结果准确和计算效率的前提下,忽略密度较小介质所受离心力作用,如图 3 将转子三维转动转化为二维平动^[24-25].利用 Gambit 软件进行网格划分,流道区域上下两侧设为周期性边界,端口、间隙及流道内部均采用结构化网格,全局尺寸为 0.5 mm×0.5 mm,间隙及其附近网格进行局部加密,最终得到数值模型如图 4 所示.利用 ANSYS Fluent 软件进行瞬态计算,介质近似为理想空气;湍流计算采用 RNG $k-\epsilon$ 模型;选用 AUSM+二阶迎风格式进行离散^[26-28],密度基隐式算法进行求解.

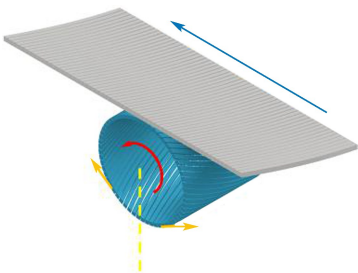


图 3 三维向二维转换示意图

Fig. 3 Conversion diagram from 3D to 2D

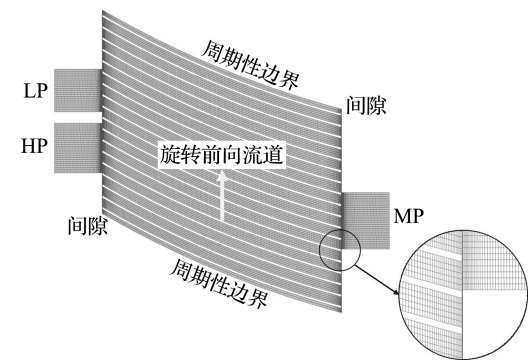


图 4 二维网格模型示意图

Fig. 4 The diagram of 2D mesh model

基于 Okamoto 等的实验结果^[29], 在相同工况及结构参数下基于上述数值方法得到流道内静压波动曲线与实验数据对比如图 5 所示. 分析发现虽然由于忽略壁面传热以及粗糙度等因素导致模拟与实验存在细微偏差, 但整体压力波变化规律与实验基本吻合, 说明本文采用的数值模型可用于预测波转子内部气流运动情况, 误差处于可接受范围.

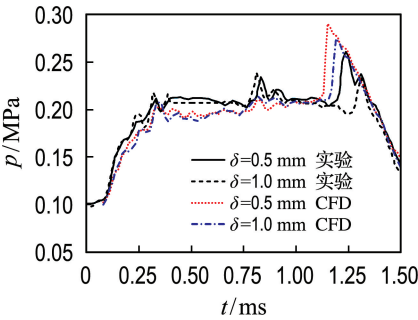


图 5 模拟与实验静压值

Fig. 5 Simulation and experimental value of static pressure

2.2 不同倾角波转子性能及流场分析

按照上述数值模型, 在表 1 所示工况下, 对表 2 中不同倾角组合的前向流道波转子进行数值分析, 得到其引射率和等熵效率如图 6 所示.

引射率和等熵效率计算公式如下:

$$\xi = \frac{m_1}{m_h} \tag{5}$$

$$\eta = \frac{m_1 T_1 \left(\left(\frac{p_m}{p_l} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{m_h T_h \left(1 - \left(\frac{p_m}{p_h} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \tag{6}$$

式中: ξ 为引射率; η 为等熵效率; m_h 、 m_1 为高、低压端口处气体质量流量, kg/s; T_h 、 T_l 为高、低压

表 2 波转子流道倾角组合

Tab. 2 Combination of wave rotor channel inclination angles

编号	进口倾角 $\theta_i / (^\circ)$	出口倾角 $\theta_o / (^\circ)$
1	15	30
2	15	45
3	15	60
4	15	75
5	15	90
6	30	45
7	30	60
8	30	75
9	30	90
10	45	60
11	45	75
12	45	90
13	60	75
14	60	90
15	75	90

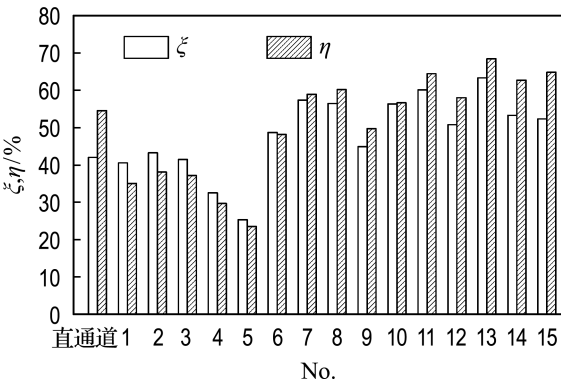


图 6 不同倾角组合波转子性能参数

Fig. 6 Performance parameters of wave rotors with different inclination angles

端口处气体滞止温度, K; p_h 、 p_m 、 p_l 为高、中、低压端口处滞止压力, Pa; k 为绝热指数.

分析图 6 数据可知, 针对表 1 工况, 进口倾角 θ_i 为 60° 、出口倾角 θ_o 为 75° 的波转子引射率和等熵效率最高, 与理论设计过程吻合. 进一步对比分析各波转子内部流场如图 7 所示, 其中图 7(a) 为直通道波转子流线图, 此时入射气体由于受壁面施加的作用力而产生与通道运动方向相同的牵连速度, 从而在进出口处产生明显旋涡和流动分离现象; 而图 7(b) 中所示的 $60^\circ/75^\circ$ 倾角组合波转子由于经过合理的设计, 上述现象明显减少. 图 7(c) 和 (d) 代表两种偏离最优设计点的前向流道结构, 针对图 7(c), 在进口倾角不变的条件下,

增大出口倾角,发现进气侧流线基本与图 7(b)一致,但出口侧气流由于受到壁面的作用,可明显观察到与直通道相同的流动分离现象;图 7(d)是在出口倾角不变条件下减小进口倾角,从流线图中可看出进气侧由于匹配不合理导致流道上壁面对气流运动产生抑制,造成能量损失,进而影响出口处的匹配关系,产生轻微的流动分离。

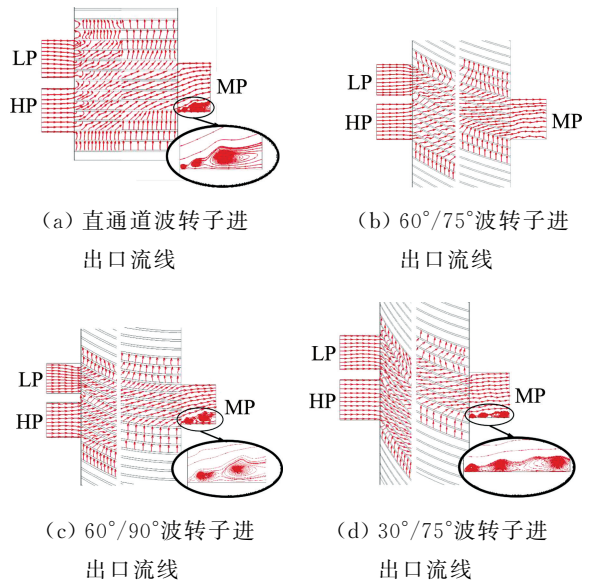


图 7 不同倾角组合转子进出口流线图
Fig. 7 The streamline diagram of inlet and outlet of rotors with different inclination angles

综上,针对表 1 所示工况,进出口倾角 θ_i 和 θ_o 分别为 60° 和 75° 的前向流道波转子可有效减少转子与气流间相互作用力,避免旋涡和流动分离等影响设备性能的现象产生,从而提升引射性能,证明前向流道倾角理论设计方法的正确性。

3 性能实验及影响因素分析

基于理论设计及数值模拟结果,为与直通道波转子实验数据进行对比,参照文献[12]所用直通道波转子整体尺寸设计前向流道波转子,仅将流道形式改为进口倾角 θ_i 为 60° 、出口倾角 θ_o 为 75° 的前向流道,得到转子内部实物如图 8 所示。搭建如图 9 所示引射性能测试平台,实验中,高压气体由压缩机提供,并经过集气罐 C_1 和稳压罐 C_2 保证气流稳定,阀 V_3 和 V_4 可分别调节高压和中压端口压力,低压气源为大气,采用压力表、温度传感器和风速仪等设备测量各端口压力、温度以及气体流速,进而计算得到不同压缩比 α 和

膨胀比 β 下设备引射性能。

$$\alpha = \frac{p_m}{p_1} \tag{7}$$

$$\beta = \frac{p_h}{p_1} \tag{8}$$



图 8 前向流道波转子结构实物图
Fig. 8 The photo of forward-curved channel wave rotor

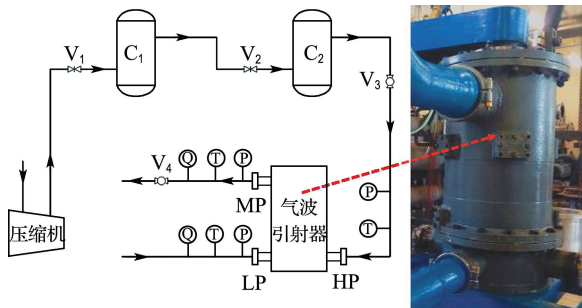


图 9 气波引射实验流程图
Fig. 9 The experimental flow chart of gas wave ejection

采用控制变量方法研究压缩比 α 和膨胀比 β 对前向流道波转子引射性能的影响规律,实验中转速恒定为 288.75 rad/s ,通过调节喷嘴位置保证不同工况下波系最优匹配。

首先控制高压端口压力为 0.152 MPa ,调节中压端口压力,得到固定膨胀比条件下,不同压缩比前向流道波转子引射性能实验数据,并与直通道波转子实验数据对比如图 10 所示。分析图 10 中引射率和等熵效率柱状图可看出,当压缩比较小时,由于转子内气体流速较高,反向膨胀波 E_1 较强,因此流道内低压区真空度较高,获得较高引射率,但此时流动损失增大,导致整体等熵效率较低;当压缩比较大时,中压端口附近可产生反向压缩波,影响波系匹配,导致引射率和等熵效率下降。因此,在膨胀比恒定条件下,随压缩比升高,前向流道波转子引射率逐渐降低,等熵效率先升高后降低,但均优于直通道波转子。分析前向流道波转子和直通道波转子引射率及等熵效率差值曲线

发现,虽然其整体变化规律基本与对应性能参数变化规律一致,但在压缩比为 1.20 流道倾角设计工况点,由于转子结构和气流运动间形成最优匹配,导致性能提升幅度明显高于整体趋势。

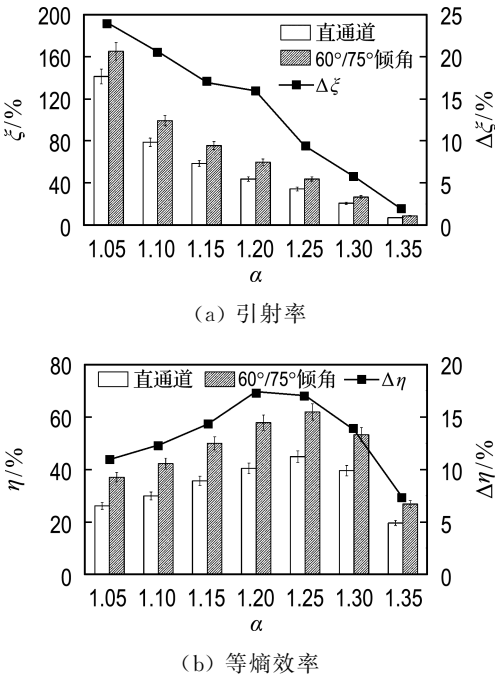


图 10 压缩比与引射率和等熵效率关系
Fig. 10 Effect of compression ratio on ejection rate and isentropic efficiency

控制中压端口压力为 0.12 MPa,调节高压端口压力,可得到固定压缩比下不同膨胀比前向流道波转子引射性能数据,与直通道波转子实验数据对比结果如图 11 所示。通过引射率和等熵效率柱状图可看出,小膨胀比时,高压和中压端口压差较小,反向膨胀波 E_1 强度较弱,甚至产生反向压缩波,导致流道与低压端口接通时真空度较低,引射性能恶化;而大膨胀比下,气体流速升高,流动损失增加。因此,在固定压缩比下,随膨胀比升高,前向流道波转子的引射率和等熵效率呈现先上升后下降趋势,但均优于直通道波转子。分析前向流道波转子与直通道波转子性能差值曲线发现,其整体变化规律与对应参数趋势一致,且提升幅度最大点均出现在膨胀比为 1.50 的设计工况附近。

综上,与直通道波转子相比,前向流道结构可有效减少气体流动损失,提升引射性能,并在倾角设计工况附近提升幅度最大,引射率和等熵效率增幅比例均达到 40%,证明此结构的合理性以及倾角设计方法的正确性。

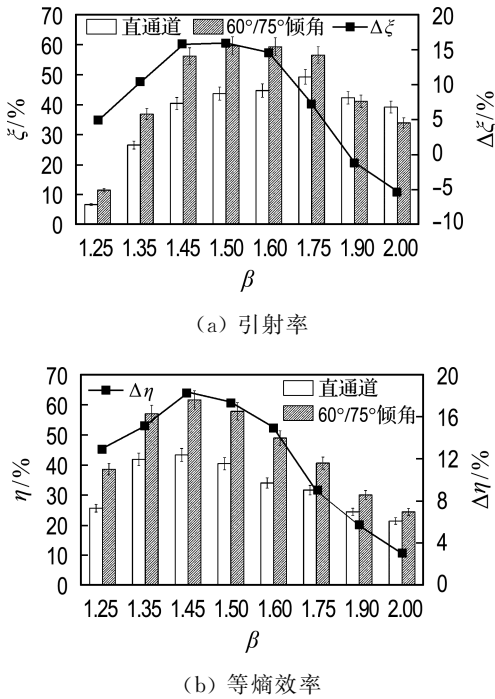


图 11 膨胀比与引射率和等熵效率关系
Fig. 11 Effect of expansion ratio on ejection rate and isentropic efficiency

4 结 论

(1)当流道进出口倾角正切值等于气体流速与转子转动线速度比值时,气流与壁面间相互作用力减小,流道形式、气流运动、转子转速三者匹配关系优化,从而有效减少各端口以及流道中流动分离和旋涡现象,降低流动损失。

(2)针对前向流道波转子,当膨胀比固定不变,随压缩比升高,引射率呈现下降趋势,等熵效率先升高后下降;反之,当压缩比固定不变,随膨胀比逐渐升高,引射率和等熵效率均呈现先升高后下降趋势。

(3)与直通道波转子相比,在相同实验条件下,前向流道波转子引射率和等熵效率有明显提升,证明此结构的合理性,并且在倾角设计工况附近设备性能提升幅度达到峰值,引射率和等熵效率增幅比例均达到 40%,进而验证了理论设计方法的正确性。

参考文献:

[1] 唐建荣,张 鹏,吴洪波,等. 天然气增压开采工艺技术在气田开发后期的应用 [J]. 钻采工艺, 2009, 32(2): 95-96.
TANG Jianrong, ZHANG Peng, WU Hongbo,

- et al.* Application of natural gas boosting technology in the later stage of gas field development [J]. **Drilling & Production Technology**, 2009, **32**(2): 95-96. (in Chinese)
- [2] 胡 辉. 洛带气田蓬莱镇组气藏增压开采方案设计 [J]. 钻采工艺, 2007(1): 141-142.
- HU Hui. Design of pressure boosting scheme for gas reservoirs of Penglaizhen Formation in Luodai gas field [J]. **Drilling & Production Technology**, 2007(1): 141-142. (in Chinese)
- [3] 邵林峰, 孙晗森, 陈仕林, 等. 煤层气田开采后期地面集输增压方式优化 [J]. 能源与环保, 2018, **40**(6): 157-161.
- SHAO Linfeng, SUN Hansen, CHEN Shilin, *et al.* Optimization of on-ground gathering transportation and pressure-improving modes in later developing period of CBM Field [J]. **China Energy and Environmental Protection**, 2018, **40**(6): 157-161. (in Chinese)
- [4] 郭显斌. 低压低产气井增压开采技术 [J]. 石化技术, 2018, **25**(6): 85.
- GUO Xianfu. Pressure-boosting stimulation in the gas wells with low pressure and production [J]. **Petrochemical Industry Technology**, 2018, **25**(6): 85. (in Chinese)
- [5] 胡新原. 低压天然气开采技术的研究 [J]. 科技创新导报, 2016, **13**(10): 59-60.
- HU Xinyuan. Research on low-pressure natural gas extraction technology [J]. **Science and Technology Innovation Herald**, 2016, **13**(10): 59-60. (in Chinese)
- [6] GYARMATHY G. How does the Comprex® pressure-wave supercharger work? [C] // **Proceedings - Society of Automotive Engineers**. Warrendale; SAE, 1983: 91-105.
- [7] AZOURY P H. An introduction to the dynamic pressure exchanger [J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, 1965, **180**(1): 451-480.
- [8] AKBARI P, MÜLLER N. Wave rotor research program at Michigan State University: AIAA 2005-3844 [R]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [9] AKBARI P, NALIM R, MÜLLER N. A review of wave rotor technology and its applications [J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2006, **128**(4): 717-735.
- [10] AKBARI P, NALIM R. Review of recent developments in wave rotor combustion technology [J]. **Journal of Propulsion and Power**, 2009, **25**(4): 833-844.
- [11] ZHAO Wenjing, HU Dapeng, LIU Peiqi, *et al.* The port width and position determination for pressure-exchange ejector [J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2012, **134**(6): 064502.
- [12] HU Dapeng, ZHAO Yiming, WU Teng, *et al.* The experimental research and mechanism analysis on the influence of wave rotor rotational speed on the wave system and flow losses of gas wave ejector [J]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, 2019, **144**: 107638.
- [13] 赵文静, 胡大鹏, 刘培启, 等. 端口夹角对气波引射器性能的影响和预测 [J]. 化工学报, 2012, **63**(2): 572-577.
- ZHAO Wenjing, HU Dapeng, LIU Peiqi, *et al.* Influence of port angle on performance of gas wave ejector and prediction for optimal angle [J]. **CIESC Journal**, 2012, **63**(2): 572-577. (in Chinese)
- [14] 赵文静. 压力振荡管流动及引射性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- ZHAO Wenjing. Flow and ejecting performance of pressure oscillating tube [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [15] HU Dapeng, ZHAO Yiming, WU Teng, *et al.* The complete performance map of gas wave ejector and analysis on the variation laws and limitation of performance [J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2020, **142**(2): 021012.
- [16] DAI Yuqiang, LIU Fengxia, WU Jintao, *et al.* Influence of skewing of contact face on performance of wave rotor refrigerators and superchargers [C] // **ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2013**. New York: ASME, 2013.
- [17] EIDELMAN S. Gradual opening of skewed passages in wave rotors [J]. **Journal of Propulsion and Power**, 1986, **2**(4): 379-381.
- [18] WELCH G E, PAXSON D E. Wave turbine analysis tool development: AIAA-98-3402 [R]. Cleveland: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998.
- [19] IANCU F, PIECHNA J, MÜLLER N. Basic design scheme for wave rotors [J]. **Shock Waves**, 2008, **18**(5): 365-378.
- [20] POHORĚLSKYĚ, SANĚP, ROZSAS T, *et al.* Wave rotor design procedure for gas turbine enhancement [C] // **2008 Proceedings of the ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air**. New York: The American Society of Mechanical

- Engineers, 2008; 847-860.
- [21] CHAN Shining, LIU Huoxing, XING Fei, *et al.* Wave rotor design method with three steps including experimental validation [J]. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2018, **140** (11): 111201.
- [22] 李维新. 一维不定常流与冲击波 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
LI Weixin. **One-dimensional Nonsteady Flow and Shock Waves** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [23] 潘锦珊. 气体动力学基础 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
PAN Jinshan. **Fundamentals of Gasdynamics** [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. (in Chinese)
- [24] WELCH G E, CHIMA R V. Two-dimensional CFD modeling of wave rotor flow dynamics [C] // **11th Computation Fluid Dynamics Conference**, 1993. Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993.
- [25] JAGANNATH R R, BANESP M, RAZI NALIM M. Numerical modeling of a wave turbine and estimation of shaft work [J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2018, **140**(10): 101106.
- [26] 王可. AUSM+格式的研究和应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
WANG Ke. Research and application of AUSM+ scheme [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [27] 涂国华, 袁湘江, 陆利蓬. 激波捕捉差分方法研究 [J]. 应用数学和力学, 2007, **28**(4): 433-440.
TU Guohua, YUAN Xiangjiang, LU Lipeng. Developing shock-capturing difference methods [J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2007, **28**(4): 433-440. (in Chinese)
- [28] 赵兴艳, 苏莫明, 苗永森. 高分辨率激波捕捉格式及其CFD应用 [J]. 计算物理, 2001, **18**(2): 133-137.
ZHAO Xingyan, SU Moming, MIAO Yongmiao. High-resolution shock-capturing scheme and its application in CFD [J]. **Chinese Journal of Computational Physics**, 2001, **18**(2): 133-137. (in Chinese)
- [29] OKAMOTO K, NAGASHIMA T. Visualization of wave rotor inner flow dynamics [J]. **Journal of Propulsion and Power**, 2007, **23**(2): 292-300.

Design and performance study of forward-curved channel wave rotor for gas wave ejection

LI Zhonghui, ZHAO Yiming, JI Yawen, HU Dapeng*

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: First of all, based on the relative motion relationship between the wave rotor and the airflow, a forward-curved channel wave rotor is designed using the theoretical method that the tangent of the inclination angle of the channel is equal to the ratio of the axial velocity of the airflow at this position to the linear velocity of the wave rotor. Then through the numerical simulation method, by using ANSYS Fluent, it is found that when the inclination angle meets the tangent relationship, the flow separation and vortex phenomena in the wave rotor and the port are significantly reduced during the ejection process, the flow loss is reduced and the ejection performance is optimal. Finally, through comparison and analysis with the experimental results of the straight channel wave rotor, it is found that the ejection rate and isentropic efficiency of the forward-curved channel wave rotor are significantly higher than that of the straight channel wave rotor under each operating condition. Near the design condition of the inclination angle, the equipment's ejection performance and improvement reach peak, both the ejection rate and the isentropic efficiency increase by 40%, proving the rationality of the forward-curved channel wave rotor.

Key words: ejector; wave rotor; forward-curved channel; optimal design; numerical simulation; experimental validation