

# 径流式转子对气波引射器性能的影响研究

刘明昊<sup>1</sup>, 李长河<sup>2</sup>, 卢 群<sup>3</sup>, 胡大鹏<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116024; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油物资有限公司新疆分公司, 新疆 库尔勒 841000)

**摘 要:** 气波引射器是一种新型的高效动态引射装置。为了验证径流式转子结构的可行性与高效性, 分别建立两种不同结构类型的转子气波引射器物理模型, 利用计算流体动力学 (CFD) 技术分别对其性能展开分析, 并在相同结构与工况条件下, 对比二者在引气和增压性能上的差异。结果表明: 同等条件下, 由于径流式转子能有效利用离心力推动气体流动, 增强激波强度, 其引射率与等熵效率约比轴流式转子高 10% ~ 20%, 证明径流式转子的可行性。在此基础上通过改变设备转速进行模拟, 得到在膨胀比为 1.5, 压缩比分别为 1.1, 1.2 和 1.2 条件下, 设备转速  $n$  为 2 757 r/min 时性能达到最优。

**关 键 词:** 气波引射器; 径流式转子; 数值模拟; 引射率; 等熵效率

中图分类号: TE93

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.04.005

[引用本文格式] 刘明昊, 李长河, 卢 群, 等. 径流式转子对气波引射器性能的影响研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(4): 32-38. LIU Ming-hao, LI Chang-he, LU Qun, et al. Study on the influence of runoff rotor on wave ejector performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 32-38.

## Study on the Influence of Runoff Rotor on Wave Ejector Performance

LIU Ming-hao<sup>1</sup>, LI Chang-he<sup>2</sup>, LU Qun<sup>3</sup>, HU Da-peng<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, Post Code: 116024;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Beijing, China, Post Code: 100083;

3. Xinjiang Branch of China Petroleum Materials Co., Ltd, Xinjiang, China, Post Code: 841000)

**Abstract:** Gas wave ejector is a new efficient dynamic ejector. In order to verify the feasibility and high efficiency of the runoff rotor structure, the physical models of two kinds of rotor gas wave ejectors with different structure types are established, which performances are analyzed by using computational fluid dynamics (CFD) technology respectively. Under the same structure and working condition, the differences in gas injection and pressurization performance between two different types are compared. The result shows that under the same condition, because the runoff rotor can effectively use the centrifugal force to push the gas flow and enhance the shock wave intensity, its ejection rate and isentropic efficiency are about 10% to 20% higher than those of the axial flow type, which proves the feasibility of the runoff rotor. On this basis, the simulation is carried out by changing the equipment speed, it is found that the performance of the equipment is optimal at the speed  $n$  of 2 757 r/min under the expansion ratio of 1.5 and the compression ratios of 1.1, 1.2 and 1.3.

**Key words:** wave ejector, runoff rotor, numerical simulation, ejection rate, isentropic efficiency

## 引言

气波引射器是一种新型、高效的动态引射装置,是利用可压缩流体非定常流动产生气体压力波实现能量传递与交换的动态引射装置<sup>[1]</sup>,该装置利用高压气体的过剩压力完成对低压气体的引射与增压,获得满足集输压力的中压气体。

目前,工业中常采用静态引射器完成引射过程,其具有无转动件、结构简单等优点,但需要通过内部湍流掺混过程完成能量交换,等熵效率较低<sup>[2-3]</sup>。而气波引射器利用气体压力波来实现能量交换,具有工作转速低、引射率高等优点<sup>[4-5]</sup>,未来应用前景更加广阔。20世纪60年代,Akbari等人<sup>[6]</sup>首先提出了三端口气波设备——均衡器(即气波引射器原型)的概念。20世纪90年代,Wilson<sup>[7]</sup>也完成了三端口气波实验平台的搭建,并利用此装置对其开发的计算程序进行了检验校正。21世纪以后,文献[8-14]对气波引射器进行了大量研究,并获得了转速、压比等操作参数对设备性能的影响规律。

传统的气波引射器通常采用轴流式波转子,而本文参考风机结构设计出一种全新类型的转子——径流式转子<sup>[15-16]</sup>。径流式转子在旋转过程中会产生较大离心力,有利于气体压力波的产生与向外传递,因此高压与低压进气口位于转子内侧,而中压出口位于转子外侧,借助离心力推动气体流动。同时,离心的过程也使激波强度进一步增大,开口反射产生的膨胀波强度也随之增强,使低压区膨胀更加充分,引射效果更明显,提高了设备性能。径流式转子可以对气体做功,产生较大的轴功并具有易于回收动压等优势,因此理论上径流式转子气波引射器比轴流式气波引射器的引射增压效果更好<sup>[17]</sup>。

首先对径流式子进行波系分析及端口匹配,再分别建立物理模型并进行数值模拟,比较在相同流道长度、相同实验参数下轴流式转子与径流式转子的引射率和等熵效率。同时,还探寻了不同转速下设备性能的区别,寻找不同工况下的最优转速。

## 1 模型设计及条件选取

### 1.1 理想波图构建

为实现气波引射增压,转子内需形成合理的波

系。其中直通道径流式转子三维结构示意图如图1所示。径流式及轴流式转子部分截面如图2和图3所示。

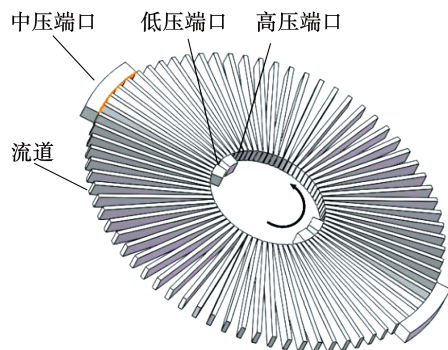


图1 直通道径流式转子三维结构示意图

Fig.1 Three-dimensional structure diagram of runoff rotor with straight channels

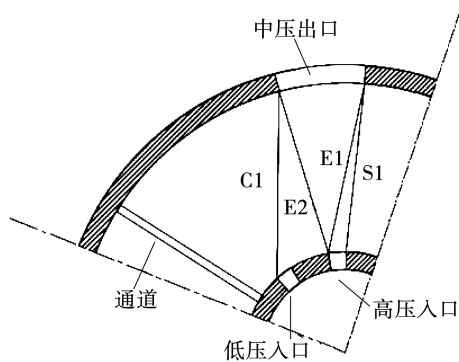


图2 径流式气波引射理想波图

Fig.2 Ideal wave diagram of runoff gas wave ejection

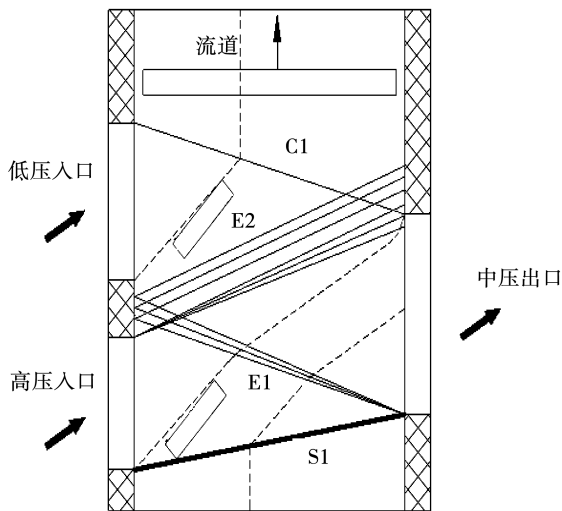


图3 轴流式气波引射理想波图

Fig.3 Ideal wave diagram of axial flow gas wave ejection

其中高压入口位置是设备功能区<sup>[18]</sup>的起始点, 流道运动至此位置时标志着新一轮引射增压过程的开启, 在端口设计时需根据设备具体结构确定。当流道与高压入口接通后, 二者间的压差使高压气体进入流道, 同时还会形成一道由压缩波系叠加形成的激波 S1 向流道出口端传播, 并对流道内气体增压。为使 S1 发生开口反射并产生反射膨胀波 E1 对流道内气体降压, 以实现低压气体的引射, 中压入口的开口位置需满足 S1 到达流道出口端时, 流道恰好与中压出口完全接通。反射膨胀波 E1 形成后由流道出口端反向向入口端传播, 为使膨胀波在流道入口端发生固壁反射以进一步降低流道内压力, 高压端口需要在 E1 波头到达流道入口端之前关闭。E1 固壁反射形成的反射膨胀波与高压入口关闭形成的膨胀波系, 由于形成时间及位置较为接近, 会叠加形成膨胀波 E2 并向流道出口端传播; 经 E1 和 E2 的共同作用后, 流道内压力急剧下降形成深度膨胀区, 当此区域压力降至低于低压气体压力后, 低压入口即可开启, 使低压气体流入转子流道, 且低压端口的开启位置需要与高压入口的关闭位置至少保持一个流道宽度以实现密封。在 E2 作用下, 流道内排气速度逐渐降低, 当到达流道出口端时, 中压排气停止, 此时中压入口需关闭以防止产气返流。由于流道与压力端口无法完成瞬间关闭, 中压出口关闭位置会形成一道向流道入口端传播的压缩波 C1, 在其作用下流道内压力会提升至超过低压气体。因此, 低压入口关闭位置应保证压缩波 C1 到达流道入口端时, 流道进入两端封闭状态。

## 1.2 性能评价指标选取

设备工作工况由膨胀比  $\alpha$  和压缩比  $\beta$  表示, 表达式为:

$$\alpha = p_h/p_l \quad (1)$$

$$\beta = p_m/p_l \quad (2)$$

式中:  $p_h, p_m, p_l$ —高压入口、中压出口和低压入口总压, kPa。

选用压力能综合利用装置通常采用的引射率和等熵效率作为评价气波引射器性能的指标。其中引射率  $\xi$  指低压气体与高压气体质量流量的比值, 反映了设备对低压气体的引射能力。引射增压过程中高、低压气体之间的能量传递效率用等熵效率  $\eta$  来判定。表达式为:

$$\xi = m_l/m_h \quad (3)$$

$$\eta = \frac{m_l T_l \left[ \left( \frac{p_m}{p_l} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{m_h T_h \left[ 1 - \left( \frac{p_m}{p_h} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4)$$

式中:  $m_h, m_l$ —高、低压气体的质量流率, kg/s;  $T_h, T_l$ —高、低压进气温度, K;  $k$ —气体绝热指数。

## 1.3 模型建立及基本参数

### 1.3.1 数值模拟基本方程

在气波增压的过程中, 虽然转子通道内流体高速运动, 且通过气体压力波进行能量传递, 但整体可看做是可压缩粘性流动过程, 因此遵循流体力学的基本方程, 其用张量形式为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

动量方程:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (6)$$

能量方程:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + v_j \frac{\partial E}{\partial x_j} = v_j f_i - \frac{v_i}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (7)$$

$E$  动能:

$$E = \frac{1}{2} v_i v_j \quad (8)$$

气体状态方程:

$$p = \rho R T \quad (9)$$

式中:  $\rho$ —流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $p$ —流体压力, Pa;  $T$ —流体温度, K;  $R$ —理想气体常数;  $t$ —时间, s;  $v_i, v_j$ — $x_i, x_j$  方向速度, m/s;  $f_i$ — $x_i$  方向上的质量力, N。

### 1.3.2 数值模型建立

为了比较同等条件下轴流式与径流式转子对设备性能的影响, 使控制设备具有相同的实验条件, 分别建立了轴流式与径流式转子直通道结构。其中, 轴流式转子的高压和低压入口置于同侧, 共 72 根振荡管, 管长 250 mm, 直通道; 径流式转子高压和低压入口位于流道内侧, 中压出口位于流道外侧, 内径 120 mm, 外径 370 mm, 管长 250 mm, 共 72 根振荡管, 直通道, 与轴流式转子相对应。

模型采用商业计算软件 Fluent 进行数值模拟计算, 模型内气体流动过程满足质量守恒、动量守恒以及能量守恒等基本守恒方程。湍流计算选用 SST-

SAS 湍流模型<sup>[19]</sup>, Krzysztof Kurec 等人<sup>[20]</sup> 采用粒子图像测速法 (PIV) 技术, 使用 SST-SAS 湍流模型对波转子流道内部流动情况的计算能力进行实验验证, 结果表明, 此模型不仅适用于计算波转子流道内部的压力和速度场分布, 还能精确表达流道内气体混合情况以及接触面变化规律。计算模型的其他相关设置如表 1 所示。

表 1   Fluent 模型相关设置  
Tab.1 Fluent model related settings

| 项 目   | 设 置     |
|-------|---------|
| 求解器类型 | 密度基求解器  |
| 流体介质  | 空气      |
| 湍流模型  | SST-SAS |
| 壁面    | 绝热/光滑   |

固定径流式及轴流式转子高压入口压力为 0.15 MPa, 固定低压入口压力为 0.101 MPa, 则膨胀比  $\alpha$  为 1.485, 中压出口压力由 0.11 MPa 逐渐加压到 0.13 MPa, 等间隔选择 5 组不同的中压出口压力进行实验, 转速始终设置为 2 757 r/min。由于转子形状较为规则, 因此轴流、径流模型都采用四边形网格, 并在控制压缩比、膨胀比及工作转速相同的情况下, 不断加密网格尺寸, 分别观察轴流式直通道转子与径流式直通道转子设备在引射率  $\xi$  上的变化情况, 如图 4 所示。当网格数量在 30 万个左右即网格尺寸为 0.5 mm×0.5 mm 时, 其设备的引射率不再发生明显变化, 证明继续的网格加密不会对模拟结果产生影响。因此, 本次模拟计算最终选定以 0.5 mm×0.5 mm 尺寸进行划分, 其中轴流式转子网格共 285 400 个, 径流式波转子网格共 314 940 个。比较轴流式与径流式转子在等熵效率及引射率上的区别。

1.3.3 数值模型验证

数值模型验证所采用的实验数据, 来自日本东京大学 Okamoto K 等人<sup>[21]</sup> 完成的转子流道内部压力波动测量实验。如图 5 所示, 此实验装置由 3 根静止的转子流道和两端移动的压力端口组成, 流道沿轴向均匀布置测试点以测试不同位置的压力变化, 选取 P 9 点的测量结果作为对比验证数据。

图 6 所示为数值计算与实验获得的 P 9 点压力随时间变化规律。通过对比发现, 虽然在数值模拟

中绝热光滑壁面的使用导致具体压力值存在一定差别, 但压力变化曲线的形状、峰值位置等基本一致, 证明本文所采用的数值模型可准确反映流道内压力波的形成及传播规律, 适用于波转子设备的数值模拟计算。

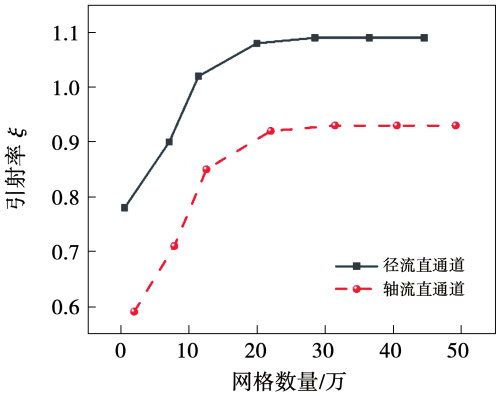


图 4 网格无关性验证  
Fig.4 Grid independence verification

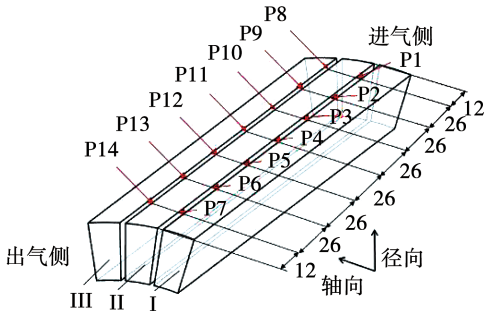


图 5 模型验证采用的实验装置测试点分布示意<sup>[21]</sup> (mm)  
Fig.5 Schematic diagram of the distribution of test points of the experimental device used for model verification<sup>[21]</sup> (mm)

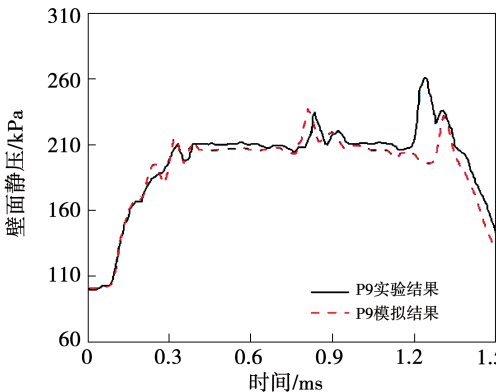


图 6 模拟与实验获得的 P 9 点壁面静压随时间的变化规律  
Fig.6 Variation rule of wall static pressure at point P 9 obtained by simulation and experiment with time

2 性能对比

2.1 轴流与径流直通道转子性能对比

在上述的结构参数与实验条件下,增加 2 种转子的压缩比,分别设置压缩比为 1.1、1.2 和 1.3,比较不同压缩比下两类转子的引射率与等熵效率。其中,在压缩比为 1.2 时,两类转子的静压分布图分别如图 7 和图 8 所示。

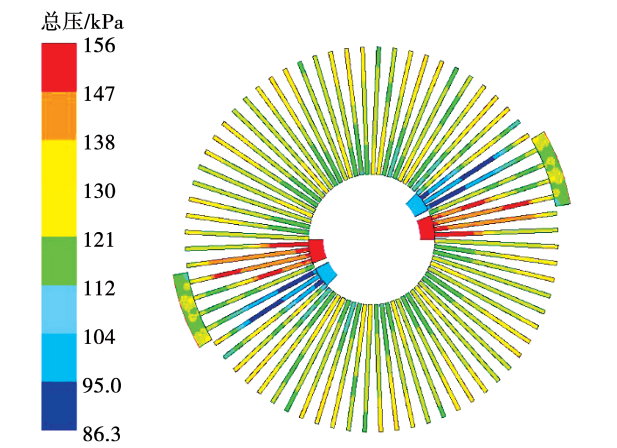


图 7 压缩比为 1.2 时径流式转子静压分布云图  
Fig. 7 Static pressure distribution nephogram of runoff rotor at compression ratio of 1.2

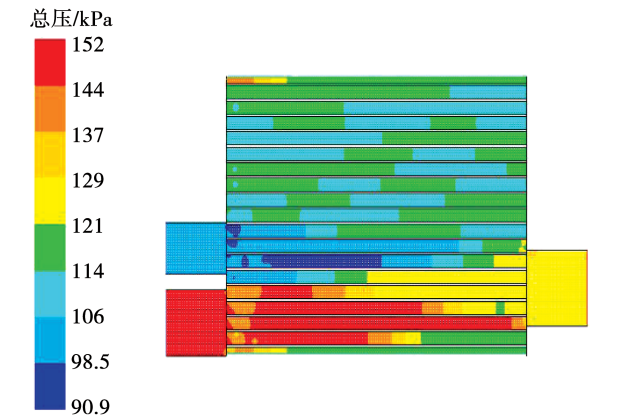


图 8 压缩比为 1.2 时轴流式转子静压分布云图  
Fig. 8 Static pressure distribution nephogram of axial-flow rotor at compression ratio of 1.2

经过数值模拟得到压缩比与等熵效率及引射率的关系曲线如图 9 和图 10 所示。分析两图可知,在固定膨胀比为 1.485 的条件下,引射率随着压缩比增大而持续减小,等熵效率则随着压缩比的增大呈现先提升后下降的趋势。

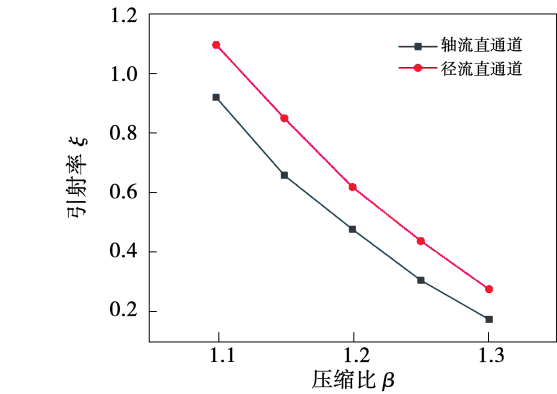


图 9 径流与轴流转子引射率对比  
Fig. 9 Comparison of ejection rates of runoff and axial flow rotors

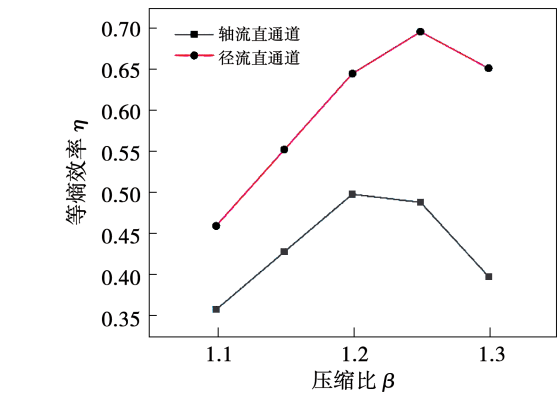


图 10 径流与轴流转子等熵效率对比  
Fig. 10 Comparison of isentropic efficiencies of runoff and axial flow rotors

当膨胀比一致时,增大压缩比,即升高中压出口压力,使得通道与低压入口接通后,中压出口处产生的压缩波 C1 的强度降低,导致流道内压力平稳区域的压力随之降低。因此,高压入口处气体与通道内原有气体的压差增大,致使高压入射的气体速度增大。同时,压差大使得激波能量较强,损失也因此增大,这都会导致轴流式与径流式转子的引射率有所降低。但是,由于离心力的作用,径流式转子的引射效果更明显,在压缩比为 1.10 的时候引射率可达到 108%,其各个条件下的引射率平均比轴流式转子多 10% ~ 20%。

如图 10 所示,当压缩比较小时,中压出口压力较低,导致中压出口接通时形成的膨胀波强度较大,中压出口处速度增加,低压入口处较高的引射速度使得气波引射器内部流动损失增加,此时设备的等

熵效率下降。在此条件下,径流式转子效率并不高,大约为 45%,但仍比轴流式转子高约 10%。当压缩比在 1.2 ~ 1.25 左右时,等熵效率达到峰值;当压缩比增大到 1.3 时,由于高压入口气体与通道内原有气压差增大,导致激波增强,激波损失增大,引起等熵效率下降。但总体上,径流式转子等熵效率都明显优于轴流式转子,径流式转子对气波引射器的性能提升效果显著。

2.2 转速对径流式气波引射器性能影响

径流式转子的转速影响着转子内气体离心力的大小以及转子完成一个旋转周期所需要的时间,因此对于同一个转子,不同的转速意味着设备性能不同。固定转子各结构参数,控制膨胀比  $\alpha = 1.485$ , 压缩比  $\beta$  分别取 1.1, 1.2 和 1.3 进行模拟,每组压缩比下转速从 2 100 r/min 逐渐增加到 4 600 r/min, 其设备性能随转速的变化曲线如图 11 和图 12 所示。

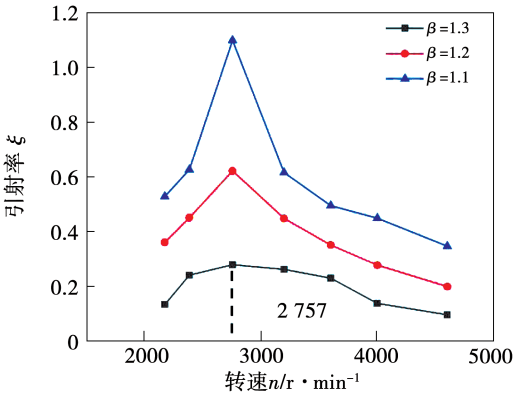


图 11 不同转速下渐扩流道转子引射率曲线  
Fig. 11 Curves of ejection rates of rotor with gradually expanding channels at different speeds

由图 11 和图 12 可知,在不同压缩比下,设备引射率与等熵效率趋势相同,均随转速的增大而先增大后减小,且存在一个最优转速,即在  $n = 2\ 757$  r/min 处取得最大值。当转子尚未达到最优转速,入射激波传递到流道外侧时,流道还没与中压出口接通,导致激波发生固壁反射生成反向激波,在流道内振荡,造成流道内部气体压力高于设计压力,影响低压入口处引射,使得气波引射器性能下降。而当转子转速高于最优转速时,在入射激波尚未到达时中压出口便提前开启。由于中压出口长度一定,转速

的增加和提前开启导致中压气体不能完全排出,中压出口提前关闭形成较强的反向压缩波,同样影响低压区的引射效果。

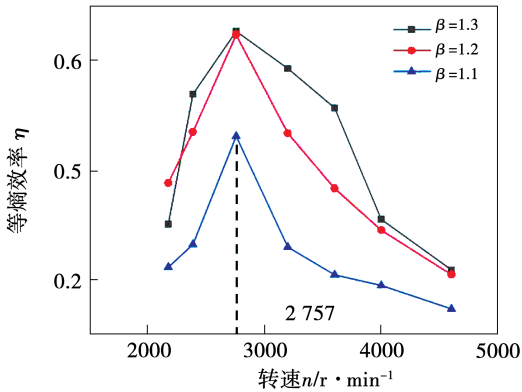


图 12 不同转速下渐扩流道转子等熵效率曲线  
Fig. 12 Curves of isentropic efficiencies of the rotor with gradually expanding channels at different speeds

3 结 论

基于提升气波引射器的性能,提出了径流式气波引射器。通过数值模拟计算进行设计,将转子内部波系图与转子理想波系图进行匹配,分析径流式转子合理性,并在控制同等膨胀比的条件下,改变压缩比,比较径流式与轴流式气波引射器的引射率与等熵效率,并通过改变转子转速,找到该工况下最佳转速条件。综合比对波转子形状对设备性能的影响,结论如下:

- (1) 在膨胀比为 1.485 的条件下,增加压缩比,径流式与轴流式直通道转子的引射率均有下降,但径流式转子的引射率比轴流式转子平均高 10% ~ 20%。
- (2) 压缩比从 1.1 逐渐升至 1.3 的过程中,控制膨胀比不变,不同形状的气波引射器等熵效率均先增大后减少,存在效率峰值,径流式转子等熵效率明显高于轴流式直通道转子。
- (3) 径流式转子压缩比在 1.1, 1.2 及 1.3 的条件下,设备性能均随转速的增大而先增大后减小,在  $n = 2\ 757$  r/min 转速下设备性能达到最优。

参考文献:

[1] 吴 腾,郑友林,魏 蓓,等. 间隙对气波引射性能影响的实验

- 研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35(1): 133 – 139.
- WU Teng, ZHENG You-lin, WEI Bei, et al. Experimental study on influence of gap on performance of gas wave ejector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35 ( 1 ): 133 – 139.
- [2] 尚 阳, 王跃社. 单喷嘴低压引射器的结构设计及数值分析[J]. 化工进展, 2017, 36(S1): 107 – 114.
- SHANG Yang, WANG Yue-she. Structural design and numerical analysis of single nozzle low pressure ejector[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(S1): 107 – 114.
- [3] 倪永涛, 赵钦新, 桂 雍, 等. 两级低压引射器的结构设计及数值分析[J]. 化工进展, 2020, 39(S1): 69 – 76.
- NI Yong-tao, ZHAO Qin-xin, GUI Yong, et al. Structural design and numerical analysis of two-stage low-pressure ejector [ J ]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39 ( S1 ): 69 – 76.
- [4] GYARMATHY G. How does the complex pressure-wave supercharger work[M]. USA: SAE Technical Paper, 1983.
- [5] AZOURY P H. An introduction to the dynamic pressure exchanger [J]. Archive Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1966, 180(18): 451 – 480.
- [6] AKBARI P, NALIM R, MULLER N. A review of wave rotor technology and its applications[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of the ASME, 2006, 128 ( 4 ): 717 – 735.
- [7] WILSON J. An experimental determination of losses in a three-port wave rotor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of the ASEM, 1998, 120(4): 833 – 842.
- [8] HU Da-peng, ZHAO Yi-ming, 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-transactions of the ASEM, 2020(2): 0210122.
- [9] HU Da-peng, ZHAO Yi-ming, 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.
- [10] ZHAO Wen-jing, HU Da-peng, LIU Pei-qi, et al. The port width and position determination for pressure-exchange ejector [ J ]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-transactions of the ASEM, 2012, 134(6): 0645026.
- [11] HU Da-peng, YU Yang, LIU Pei-qi. Enhancement of refrigeration performance by energy transfer of shock wave[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 309 – 318.
- [12] 赵一鸣, 李浩然, 刘明昊, 等. 气波引射器反馈结构的功能机理及性能实验[J]. 过程工程学报, 2021, 18(4): 1 – 12.
- ZHAO Yi-ming, LI Hao-ran, LIU Ming-hao, et al. Functional mechanism and performance of gas wave ejector feedback structure[J]. The Chinese Journal Process Engineering, 2021, 18(4): 1 – 12.
- [13] 于 洋, 刘培启, 王云磊, 等. 高效气波冷凝装置流动及热力学特性[J]. 化工学报, 2017, 68(8): 3039 – 3048.
- YU Yang, LIU Pei-qi, WANG Yun-lei, et al. Flow and thermodynamic properties of efficient gas wave refrigeration plant[J]. CIESC Journal, 2017, 68(8): 3039 – 3048.
- [14] 李忠辉, 赵一鸣, 纪雅文, 等. 气波引射前向流道波转子设计及性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(6): 577 – 583.
- LI Zhong-hui, ZHAO Yi-ming, JI Ya-wen, et al. Design and performance study of forward-curved channel wave rotor for gas wave ejector[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2020, 60(6): 577 – 583.
- [15] 袁 博. 径流型深度膨胀式气波制冷机性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- YUAN Bo. Study on the performance of radial over-expanded gas wave refrigerator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [16] 谢明明. 径流式气波制冷机性能参数研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- XIE Ming-ming. Parameter study on the radial-flow gas wave refrigerator[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [17] 王云磊. 压力振荡管结构与操作参数对引射性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- WANG Yun-lei. Impacts of structural and operating parameters on the ejecting performance of pressure oscillator tube[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [18] 吴 腾. 气波引射器的流动与性能研究及结构优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WU Teng. Flow and performance research and structural optimization of gas wave ejector[J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [19] MENTER F R, EGOROV Y. The scale-adaptive simulation method for unsteady turbulent flow predictions, part 1: theory and model description[J]. Flow Turbulence and Combustion, 2010, 85(1): 113 – 138.
- [20] KUREC K, PIECHNA J, GUMOWSKI K. Investigations on unsteady flow within a stationary passage of a pressure wave exchanger, by means of PIV measurements and CFD calculations [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 610 – 620.
- [21] OKAMOTOK K, NAGASHIMA T. Visualization of wave rotor inner flow dynamics[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2): 292 – 300.