

液环泵内过压缩特性及排气口单向阀工作机理

张人会^{1,2} 蒋利杰¹ 郭广强¹ 孙鹏程¹ 孟凡瑞³

- (1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050;
2. 兰州理工大学甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050;
3. 淄博水环真空泵有限公司, 淄博 255200)

摘要 针对液环泵内易发生的气体过压缩现象, 采用 VOF 两相流模型对液环泵压缩机工况下的内部气液两相流动进行数值模拟, 研究排气口前端单向阀的开启对液环泵流动结构及性能的影响, 分析不同压缩比工况下泵内的压力分布以及相态分布等规律。结果表明, 随着液环泵排气口压力的降低, 液环泵排气口前端容易发生压缩现象, 过压缩现象会导致液环泵的功率损失增大, 降低液环泵的效率。排出口压力越低, 则过压缩现象越严重。在低压缩比工况下排气口前端的单向阀在压差的作用下自动开启, 可以有效地避免发生过压缩现象, 提升液环泵的效率及吸气量。为分析排气口前端单向阀面积变化规律对液环泵性能的影响, 在原始设计的基础上提出三种不同面积变化规律的单向阀布置, 对比分析发现, 低压缩比工况下适当增大排气口前端单向阀的面积可以有效地提高液环泵的吸气量, 降低阀流速, 提升液环泵的性能。

关键词 过压缩; 气液两相流; 液环泵; 单向阀

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2020)07-1673-06

Over-compression Characteristic in Liquid Ring Pump and Working Mechanism of Exhaust Check Valve

ZHANG Ren-Hui^{1,2} JIANG Li-Jie¹ GUO Guang-Qiang¹ SUN Peng-Cheng¹ MENG Fan-Rui³

- (1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
3. Zibo Water Ring Vacuum Pump Factory Co., LTD, Zibo 255200, China)

Abstract Concerning the gas over-compression phenomenon which is easily occur in liquid ring pump, the VOF two-phase flow model was used to simulate the internal gas liquid two-phase flow in liquid-ring pump at compressor conditions. The effects that opening of exhaust check valve on the flow structure and hydraulic performance of liquid-ring pump was investigated, and the pressure and phase distribution of pump inner flow under different compression ratio was analyzed. The results show that the over-compression phenomenon is easily occur in the front of exhaust with the decrease of outlet pressure, which would lead the increasing the energy consumption and decreasing of pump efficiency. The over-compression phenomenon aggravates with the decrease of outlet pressure. Under lower compression ratio condition, the exhaust check valve would open automatically with the action of pressure difference, which can effectively avoid the over-compression phenomenon, and improve the efficiency and suction capacity of the liquid ring pump. To analyze the effects of the exhaust check valve area on the performance of liquid ring pump, three kinds of check valve arrangement with different area were proposed on the basis of original design. The analysis results show that under the lower compression ratio condition, the larger area of check valve can effectively increase the suction capacity of liquid ring pump, reduce the velocity of the valve, and enhance the performance of pump.

Key words over-compression; gas-liquid flow; liquid ring pump; check valve

收稿日期: 2019-09-17; 修订日期: 2020-06-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2016YFB0200901); 国家自然科学基金项目 (No.51979135, 51469014); 甘肃省陇原创新人才计划项目

作者简介: 张人会 (1977-), 男, 江西都昌人, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械内部流动及性能优化研究。

0 引言

液环泵是一种用来抽送气体的流体机械,由于等温压缩、结构紧凑、抽气量大等优点被广泛应用于煤炭、化工、电力、冶金、食品等领域,特别是在大型煤矿瓦斯的抽放、高超音速多功能风洞中的真空设备、核电站抽凝用大型真空设备等国家重大需求。但由于泵内部复杂的气液两相流导致其能量损失大、效率较低。为此,液环泵内复杂流动结构及性能的优化分析引起了国内外研究人员的高度关注。Raizmam 等^[1]为了研究液环泵内部流动,采用实验测试方法研究液环泵内各个截面上的压力分布,同时研究了液环泵内的速度场分布。Ushiyama, Obara S 等^[2-3]针对液环泵内复杂的两相流动,分别采用移动粒子半隐式方法(MPS)和基于 GPU 粒子方法对液环泵内部非稳态流动进行数值模拟。黄思^[4-6]、黄苗苗^[7]、廖济等^[8]等运用数值模拟方法对液环泵内气液两相流动结构及性能进行分析。张人会等^[9-11]采用数值模拟与实验相结合的方法进行液环泵内复杂流动的研究,并提出基于本征正交分解(POD)方法的液环泵内气液两相流场重构的代理模型。任德高^[12]、张克危^[13]通过实验对比分析了液环泵叶顶径向间隙对泵性能的影响。液环泵排气口始端角位置一般按照其临界压缩比来设计,当泵的出口压力小于其临界压力时,泵内的气体被压缩到出口压力 p_2 后,将被继续压缩到临界压力 p_{cr} ,到达排出口后其压力又下降至出口压力 p_2 ,此即为液环泵内的过压缩现象,气体被过度压缩,导致液环泵效率下降。目前国内外对于液环泵的研究主要针对其内部复杂的气液两相流场结构及基于流场分析基础上的内流道几何的优化分析^[1-13],但对其压缩机工况下的过压缩现象及排气口前端单向阀工作机理的研究鲜有报道。

过压缩现象在其它类型的压缩机内也普遍存在,相关科研人员对其已做了大量的研究。彭学院等^[14]针对单齿转子压缩机的排气过压缩过程进行研究,通过排气孔提前开启来避免过压缩,提升压缩机的效率。刘蓉等^[15]研究了涡旋制冷压缩机在过压缩工况下各参数对于压缩机性能的影响,在过压缩工况下通过提高转速来提升压缩机的性能。陈清等^[16]针对可变内容积比的变频单螺杆压缩机进行试验研究,通过调节压缩腔的容积来实现容积比随工作压缩比不断变化,降低由于过压缩造成的能量损失,提升了压缩机的效率。

为了避免液环泵在低压缩比工况下运行时发生过压缩现象,工程上一般在排气口前端设置多个单向

阀。但单向阀的开启对液环泵内流动及性能的影响、阀孔面积变化规律对泵性能的影响机理等并不十分清楚。为探究液环泵排气口单向阀工作机理,为进一步提升液环泵性能提供理论支撑,本研究采用数值模拟与实验相结合的方法对比分析单向阀的开启以及单向阀面积变化规律对液环泵的流动及性能的影响。

1 计算模型

1.1 几何模型及参数

本研究以 SY 型液环泵为研究对象,转速为 $1480 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,进口为标准大气压,工作介质温度为 20°C 。液环泵基本参数如表 1 所示。

表 1 液环泵基本参数

Table 1 Basic parameters of liquid-ring pump

壳体半径 R/mm	250
叶轮宽度 b_2/mm	215
叶轮直径 D_2/mm	430
排气量 $q/\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$	15
轮毂直径 D_1/mm	220
偏心距 e/mm	30
叶片数 Z	18
转速 $n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1480

液环泵所求解的流动区域包括:进气口、排气口、壳体、叶轮以及单向阀等五部分,暂不考虑叶轮轴向叶顶间隙内的泄漏。对整个求解区域划分六面体结构化网格,经过网格无关性验证,其网格总数为 1235080,其二维结构及计算域网格如图 1 所

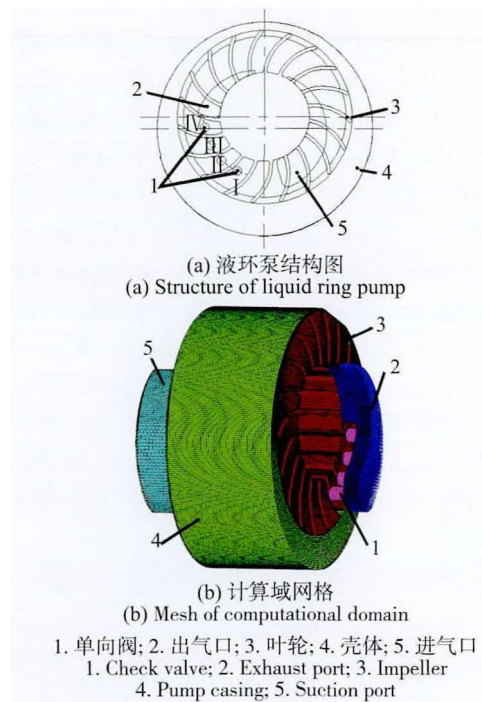


图 1 液环泵结构图及计算域网格

Fig. 1 Structure and mesh of computational domain of liquid ring pump

示, 在排气口前端沿圆周方向等距布置 4 个单向阀 (I~IV)。

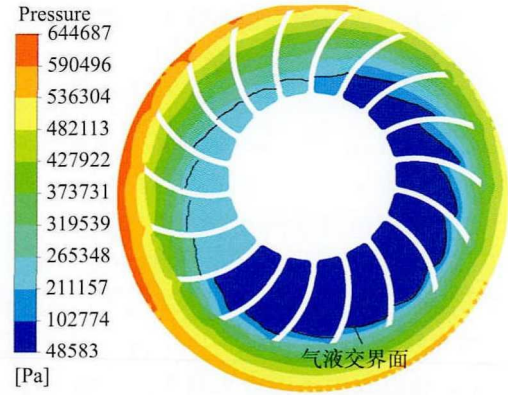
1.2 边界条件设置

液环泵内部流动为复杂的气液两相流, 为了精确的捕捉内部气液自由分界面, 采用 VOF 两相流模型^[17], 湍流模型采用 RNG $k-\epsilon$ 两方程模型, 考虑气体的可压缩性, 采用滑移网格方法处理叶轮的旋转区域, 近壁面采用标准壁面函数, 无滑移壁面条件, 速度场及压力场耦合采用 PISO 算法, 选取压力进口边界条件 (标准大气压), 压力出口边界条件 (按照不同工况选取), 选取时间步长为 2×10^{-5} s。

2 计算结果分析

本研究首先在排气口前端单向阀全关闭的状态下进行数值模拟, 待计算结果稳定后, 依据单向阀两侧压力差判定其是否开启, 将要开启的阀门设置打开后继续进行数值模拟直到再次稳定。保证其他边界条件不变, 分别在额定工况 (0.26 MPa), 小流量工况 (0.12、0.18 MPa 和 0.22 MPa) 以及大流量工况 (0.30 MPa) 下对液环泵内流动进行数值模拟。截取额定工况 0.26 MPa 下的轴垂面, 其上的相态及压力分布如图 2 所示:

由图 2(a) 相态分布可以看出, 液环泵内气液两相基本呈完全分离状态, 气液交界面呈较为稳定的锯齿形状, 从图 2(b) 压力分布可以看出流场压力沿圆周方向由吸气区到压缩区、沿径向方向由叶轮轮毂到泵壳体内壁逐渐增大, 在排气区壳体内壁存在局部的高压区, 在吸气区及排气区内压力分布基本均匀, 但在气液交界面上压力分布存在较大的法向梯度 (图 2(b) 中黑色标记线为图 2(a) 相态分布图中的气液交界面)。



(b) 压力分布

(b) Pressure distribution

图 2 相态及压力分布

Fig. 2 Phases and pressure distribution

图 3 为液环泵数值模拟结果与实验值对比, 可以看出液环泵的数值模拟结果与实验结果趋势基本一致。出口压力从 0.12 MPa 到 0.30 MPa 范围内, 由于数值模拟未考虑叶轮轴向叶顶间隙的泄漏, 数值模拟吸气量整体高于实验吸气量, 而且流量的偏差基本恒定, 功率的预测偏差随出口压力的增大而增大, 最小误差约为 1%。数值结果表明, 小流量工况 (0.12、0.18 MPa 和 0.22 MPa) 时液环泵内发生了过压缩现象。而在额定工况 (0.26 MPa) 以及大流量工况 (0.30 MPa) 时液环泵内不存在过压缩现象。

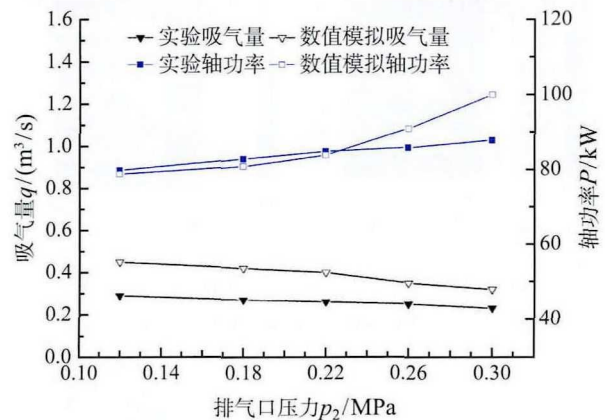
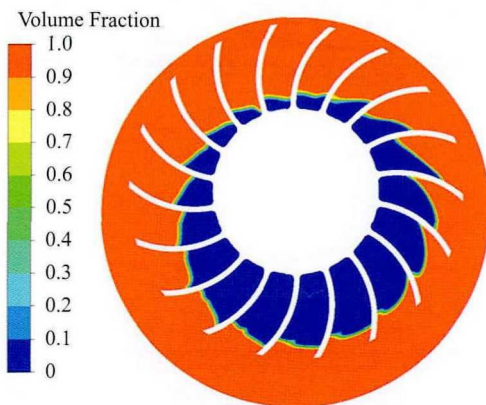


图 3 数值模拟结果与实验结果对比

Fig. 3 Comparison of the hydraulic performance between the CFD and experiment results

为研究单向阀开启后阀孔内流场及叶轮内流场的变化, 截取经过各单向阀中心的圆柱截面 (如图 1 虚线所示), 阀孔中心截面流场分布如图 4。

图 4 中箭头所示方向为叶轮旋转方向, 可以看出液环泵发生过压缩时, 叶轮流道内压力大于相应



(a) 相态分布

(a) Phases distribution

阀孔内的压力，此时单向阀在压差的作用下自动打开，当单向阀开启时，叶轮流道内的气体被压缩由面积较小的单向阀孔流出，过流面积急剧变小，导致阀孔内速度急剧增大。图 4(a1) 为出口压力在 0.12 MPa 下的阀孔中心截面的压力分布，此时单向阀 I~IV 均处于开启状态，可以看出叶轮流道内压力大于泵出口压力，图 4(b1) 为阀孔中心截面的速度分布，可以看出阀孔内速度急剧增大；图 4(a2)、图 4(a3) 分别为出口压力为 0.18 MPa、0.22 MPa 时阀孔中心截面的压力分布，可以看出这两种工况下单向阀 III、IV 处叶轮流道内压力均大于其阀孔内及泵出口压力，单向阀 III、IV 处于开启状态，而单向阀 I、II 处叶轮流道内压力小于其阀孔内及泵出口压力，单向阀 I、II 处于关闭状态。图 4(b2)、图 4(b3) 为阀孔中心截面的速度分布，可以看出单向阀 III、IV 孔内速度急剧变大。图 4(a4) 为排气口压力在 0.30 MPa 下的阀孔中心截面的压力分布，可以看出叶轮流道内压力均低于泵出口压力，不存在过压缩现象，此时单向阀 I~IV 均处于关闭状态，图 4(b4) 阀孔中心截面速度分布可以看出阀孔内的速度均为零。

对比液环泵排气口前端设置单向阀后与无单向阀设计时的液环泵性能曲线如图 5 所示。

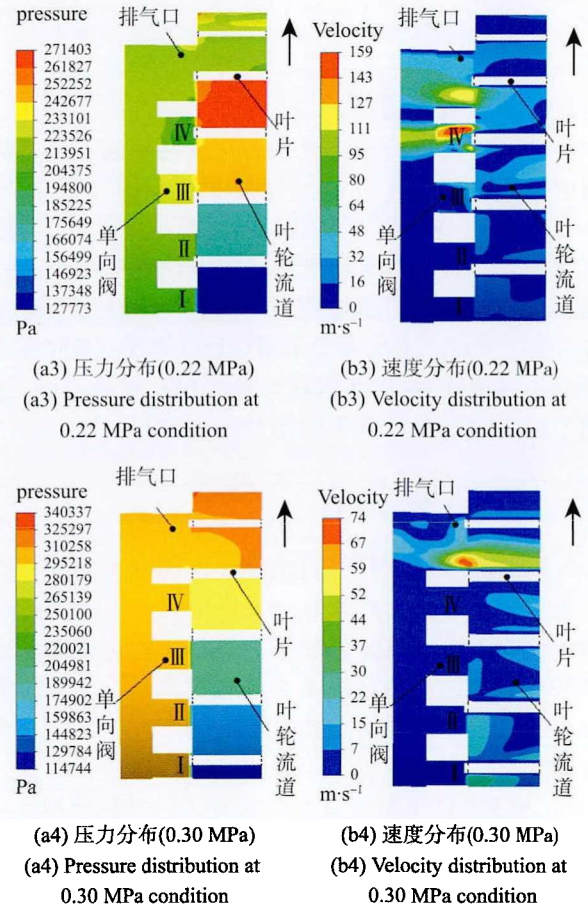


图 4 不同工况下阀孔中心截面流场分布

Fig. 4 Flow field distribution of valve center section under different operation conditions

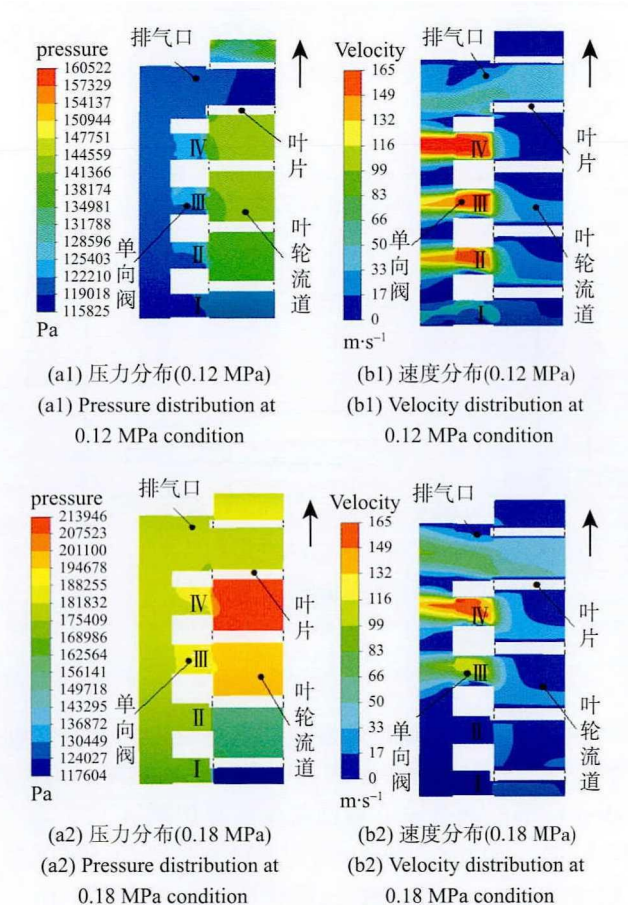


图 5 液环泵性能曲线

Fig. 5 Performance curve of liquid ring pump

从图 5 可以明显看出，随着排气口压力的增大，液环泵效率先增大后减小，吸气量持续减小，轴功率逐渐增大。对比有无单向阀时的外特性曲线，发现在小流量工况下，排气口前端的单向阀能很好地避免过压缩现象，减少了额外的能量损失，增大了泵的吸气量和效率均，降低了轴功率，液环泵的性能

能得到了改善。

3 单向阀孔面积变化规律对液环泵性能的影响

单向阀打开后, 其面积属于排气口面积的一部分, 因此单向阀面积对泵的性能有重要的影响, 为分析该面积对泵性能的影响, 在原始设计 1 的基础上提出了以下三种单向阀面积变化规律不同的方案。原始设计 1 中所有单向阀直径均为 24 mm(周向均匀分布); 方案 2 所有单向阀直径均增大到 30 mm; 方案 3 单向阀直径沿叶轮旋转方向依次增大(分别为 24、26、28、30 mm); 方案 4 单向阀直径沿叶轮旋转方向逐渐减小(分别为 30、28、26、24 mm)。各方案单向阀线性变化规律如图 6 所示。

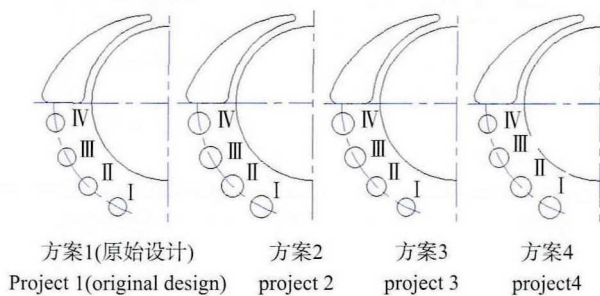


图 6 各方案单向阀面积变化规律图

Fig. 6 Area change regularity of check valve in various projects

分别对以上三种不同面积变化规律的单向阀布置方案在各工况下的内流动及性能进行数值模拟, 四种方案下阀的开启情况完全一致, 阀门开启情况如表 2。

四种面积变化规律的单向阀方案在不同工况下的吸气量曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 吸气量随排气口压力的增大逐渐降低。在出现过压缩的各个工况点, 泵吸气量随着所开启阀门的面积增大而增大。由于各方案下的阀门开启情况是一样的, 所开启的阀孔的面积由大到小依次为方案 2、方案 3、方案 4、方案 1。因此其吸气量曲线也依次由上向下排列。在 0.26 MPa 以及 0.30 MPa 出口压力下泵内不存在过压缩现象, 所有方案的单向阀均处于关闭状态, 各方案的吸气量曲线在此处重合。

表 2 单向阀开启情况

Table 2 Opening condition of check valve

工况	阀门开启情况
0.12 MPa	I ~ IV 全开
0.18 MPa	III、IV 开
0.22 MPa	III、IV 开
0.26 MPa	I ~ IV 全关
0.30 MPa	I ~ IV 全关

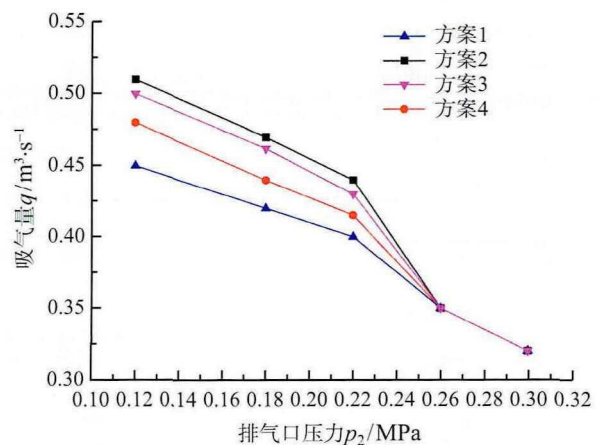


图 7 不同单向阀面积变化规律下的泵吸气量曲线

Fig. 7 Suction capacity curve of pump in different valve area arrangement

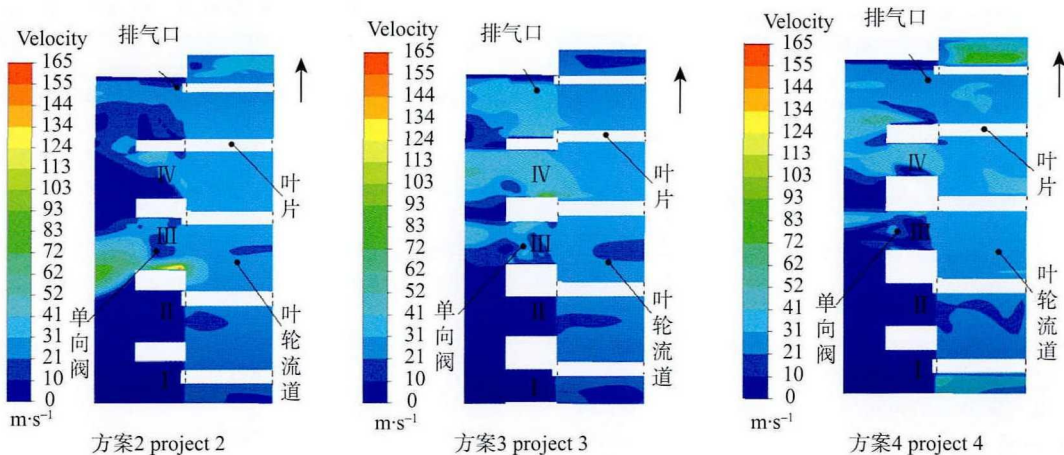


图 8 不同阀孔面积下的阀孔内速度分布 (0.18 MPa)

Fig. 8 Velocity distribution of valve for different valve area arrangement

阀孔面积对其内部的流场分布有重要的影响, 0.18 MPa 下不同方案的阀孔内速度场分布如图 8 所示。与图 4(b2) 对比可知, 单向阀孔面积增大后, 各方案的阀孔内速度相较于原始设计方案 1 均有所下降, 在阀孔内未出现局部的高速区, 提升了液环泵的性能。

4 结 论

1) 采用 VOF 两相流模型对液环泵进行数值模拟, 得到压力分布由吸气区到排气区逐渐增大, 气液两相流在离心力的作用下完全气液分离, 气液交界面呈较为稳定为锯齿形, 在气液交界面上压力分布存在较大的法向梯度。随着液环泵出口压力的降低, 液环泵排气口前端容易发生压缩现象, 降低液环泵的效率。

在排出口的前端设置单向阀能有效地避免过压缩现象, 提升了泵的效率及吸气量。低压缩比 (0.12 MPa) 时, 排气口前端的单向阀全部打开; 高压缩比时 (0.30 MPa) 则不出现过压缩现象, 所有排出口单向阀均无法打开。单向阀开启后阀孔内流速急剧增大。

排气口前端布置单向阀的面积对液环泵性能有较大的影响, 较大的单向阀面积可以有效地提升液环泵的吸气量, 降低阀孔流速, 提升液环泵的性能。

参 考 文 献

- [1] Raizman I A, MATS É B. Experimental Investigation of the Velocity Field in a Liquid Ring Vacuum-pump [J]. Chemical and Petroleum Engineering, 1972, 8(2): 134-137
- [2] Kakuda K, Ushiyama Y, Obara S, et al. Flow Simulation in a Liquid Ring Pump Using a Particle Method [J]. CMES, 2010, 66(3): 215-226
- [3] Kakuda K, Nagashima T, Hayashi Y, et al. Three-dimensional Fluid Flow Simulation Using GPU-based Particle Method [J]. Computer Modeling in Engineering and Science (CMES), 2010, 93(5): 363-376
- [4] 黄思, 阮志勇, 邓庆健, 等. 液环真空泵内气液两相流动的数值分析 [J]. 真空, 2009, 46(2): 49-52
Huang Si, Ruan Zhiyong, Deng Qingjian, et al. Numerical Analysis of Gas-liquid Two-phase Flow in Liquid-ring Vacuum Pump [J]. Vacuum, 2009, 46(2): 49-52
- [5] 黄思, 区国惟, 杨文娟, 等. 液环泵工作状态检测系统的研究 [J]. 真空, 2015, 52(3): 32-36
Huang Si, Qu Guowei, Yang Wenjuan, et al. A Study of Monitoring System for Liquid Ring Pump Working Condition [J]. Vacuum, 2015, 52(3): 32-36
- [6] 黄思, 何婧, 王学谦, 等. 基于 CFD 的液环泵性能预测及试验验证 [J]. 油气储运, 2017, 36(6): 716-721
Huang Si, He Jing, Wang Xueqian, et al. Performance Prediction of Liquid Ring Pump Based on CFD and Its Experimental Verification [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(6): 716-721
- [7] 黄苗苗, 李国君, 匡晓峰. 水环真空泵内部气液两相流动的数值分析 [J]. 船舶力学, 2011, 15(7): 722-729
Huang Miaomiao, Li Guojun, Kuang Xiaofeng. Numerical Simulation of the Gas-liquid Two-phase Flow in Water-ring Vacuum Pump [J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(7): 722-729
- [8] 廖济. 液环真空泵的数值模拟研究 [D]. 华中科技大学, 2015
Liao Ji. The Numerical Simulation of Liquid Ring Vacuum Pump [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2015
- [9] 张人会, 郭广强, 杨军虎, 等. 液环泵内部气液两相流动及其性能分析 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 99-103
Zhang Renhui, Guo Guangqiang, Yang Junhu, et al. Investigation on the Inner Gas-liquid Flow in Liquid-ring Pump and Its Performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 99-103
- [10] 张人会, 严龙钢, 杨军虎, 等. 径向间隙及叶片型线对液环泵性能影响的分析 [J]. 流体机械, 2015(8): 21-25
Zhang Renhui, Yan Longgang, Yang Junhu, et al. Influence of the Radial Gap and Blade Profile on the Performance of the Liquid Ring Pump [J]. Fluid Machinery, 2015(8): 21-25
- [11] 张人会, 吴昊, 杨军虎, 等. 基于 POD 方法的液环泵气液两相流场重构 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 381-386
Zhang Renhui, Wu Hao, Yang Junhu, et al. Reconstruction for Gas Liquid Flow of Liquid-ring Pump Based on Proper Orthogonal Decomposition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 381-386
- [12] 任德高. 水环真空泵的径向间隙对性能的影响 [J]. 真空与低温, 1990(4): 20-26
Ren Degao. Influence of Radial Gap on Performance of Water Ring Vacuum Pump [J]. Vacuum and Cryogenics, 1990(4): 20-26
- [13] 张克危. 径向间隙对液环泵临界压缩比的影响 [J]. 水泵技术, 1998(1): 20-22
Zhang Kewei. Influence of Radial Clearance on Critical Compression Ratio of Liquid Ring Pump [J]. Pump Technology, 1998(1): 20-22
- [14] 彭学院, 何志龙, 束鹏程. 单齿转子压缩机的排气过压缩研究 [J]. 压缩机技术, 1997(6): 6-8
Peng Xueyuan, He Zhilong, Shu Pengcheng. Study on Exhaust Over Compression of Single-tooth Rotor Compressor [J]. Compressor Technology, 1997(6): 6-8
- [15] 刘蓉. 涡旋制冷压缩机变工况特性数值研究 [D]. 西安理工大学, 2017
Liu Rong. Numerical Investigation on Characteristics of Scroll Compressor under Variable Operating Conditions [D]. Xi'an University of Technology, 2017
- [16] 陈清, 沈鹏飞. 可变内容积比的变频单螺杆压缩机性能试验研究 [J]. 制冷技术, 2015, 35(5): 66-69
Chen Qing, Shen Pengfei. Experimental Investigation on Performance of Inverter Single Screw Compressor with Variable Volume Ratio [J]. Chinese Journal Refrigeration Technology, 2015, 35(5): 66-69
- [17] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39: 201-225