

泵自吸过程气液两相流的可视化试验*

李红 姜波 陆天桥

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 自吸泵的自吸过程属于复杂的气液两相流动过程。通过建立泵自吸性能外特性及自吸过程气液两相流动特性协同测试系统,采用NI虚拟仪器LabVIEW编程平台,实现了对泵自吸过程中的进出口压力、流量、转速的瞬态测试;同时采用高速摄影观测系统对自吸泵叶轮、蜗壳及气液分离室内部的气液两相流动过程进行了可视化观测。结果表明:在流量未上升之前,自吸离心泵的自吸过程一直处于动态的稳定过程。气液分离室进口出现的稳定气液分离面有利于气液分离,有助于气泡的排出。而扩散段出口出现的停滞回旋气泡不利于气泡的及时排出,对自吸性能有不良的影响。在自吸末期,流量、压力均有突变的过程,且气液分离室内小水珠、扩散管处气泡数目急剧增多,随后又急剧下降,体现了明显的瞬态效应。

关键词: 泵 自吸过程 气液两相流 动态测试 可视化

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0059-07

Visualization Experiment of Gas-liquid Two-phase Flow of Pump during Self-priming Process

Li Hong Jiang Bo Lu Tianqiao

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The transient self-priming process is characterized by a complex gas-liquid two-phase flow in the pump, and the gas-liquid mixture and separation effects play a crucial role in gas exhaustion, which further affect the self-priming performance. The collaboration system between the external characteristic of self-priming performance and gas-liquid two-phase flow characteristic during self-priming process was built. Then the experimental instant pump inlet and outlet pressure, pump inlet and outlet flow rate, rotational speed were obtained and programmed by the LabVIEW software. Gas-liquid two-phase flow phenomena in the impeller, volute and gas-liquid separation chamber was observed by high-speed photography system. Results showed that the self-priming process was stable under dynamic conditions before liquid flow was increased. The stable gas-liquid separation interface which appeared at the outlet of the diffuser contributed to gas-liquid separation and gas exhaustion. Bubbles which convoluted at the outlet of the diffuser were not conducive to gas exhaustion in time. During the start-up process, the gas-liquid velocity and the number of bubbles at each section of the volute were in the oscillatory process due to the unstable pressure differential in the impeller. At last instant self-priming process, there was a sudden change in flow rate and pressure. Drops in the gas-liquid separation chamber and bubbles in the diffuser were increased sharply, and then decreased rapidly. The results testified the transient effect during the last instant self-priming process. Microscopic variations of gas-liquid two-phase flow are consistent with macroscopic variations of pressure, flow rate and rotational speed measured by experimental instruments.

Key words: Pump Self-priming process Gas-liquid two-phase flow Dynamic test Visualization

收稿日期: 2014-11-18 修回日期: 2014-12-16

* 国家自然科学基金资助项目(51279068)

作者简介: 李红, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: hli@ujs.edu.cn

引言

自吸离心泵内气液吸入、气液混合、气液分离、气体排出和液体回流等自吸过程对自吸性能具有重要影响。尤其是叶轮、蜗壳内气液混合的充分程度,气液分离室内气液分离的效率,直接影响着气体的排出速率,进而影响自吸性能^[1]。

目前关于自吸离心泵自吸过程内部流动的研究大多侧重于瞬态气液两相的数值模拟,研究自吸过程中各个时刻、各个监测点含气率、压力、速度以及气液两相的分布情况与时间的关系^[2-4]。试验研究侧重于泵自吸结构尺寸对泵自吸性能的影响以及泵自吸过程外特性的变化上,测量泵在不同安装高度下自吸瞬态过程中关键监测点参数的变化,研究瞬时转速、压力、流量、扬程、功率及效率与自吸时间的关系^[5-6]。但无法获得实际自吸过程中气泡逸出、聚并、排出,水滴的逸出、汇合、回流等复杂的微观气液两相流动现象。

近年来,高速摄影技术在气液两相流动研究中应用广泛,并在水下爆炸^[7-8]、喷雾燃烧^[9]、空化^[10-11]等复杂现象的研究中取得良好进展。

本文采用NI虚拟仪器LabVIEW动态测试系统对外混式自吸泵的进口压力、出口压力、流量、转速进行实时采集,同时采用高速摄影系统对自吸泵叶轮、蜗壳及气液分离室内的自吸过程中气液两相的流动特性进行了同步拍摄,结合动态测试试验数据分析其内部气液两相的形态变化,旨在阐明泵自吸过程中气液两相发展规律,为揭示自吸泵的自吸机理提供试验研究基础。

1 试验模型

1.1 模型泵设计

本文参考65ZB-40C型外混式喷灌自吸离心泵^[12],对模型泵进行了可视化研究设计,其主要尺寸:泵进口直径为80 mm,叶轮进口直径为65 mm,叶轮出口直径为183 mm,泵出口直径为50 mm。从方便拍摄和易于加工的角度出发,采用矩形截面蜗室、半开式叶轮、圆柱形叶片。叶轮、蜗壳、泵体均采用有机玻璃制成。有机玻璃质地均匀,无气泡、杂质,各个表面均抛光处理,透明模型泵如图1所示。

1.2 外特性性能试验

在离心泵试验台上对模型泵的水力性能与自吸性能进行多次检测试验。试验所得的性能参数结果如图2和图3所示。

根据试验结果,在泵转速 $n = 1\ 800\ \text{r/min}$ 下,最佳效率 $\eta = 56\%$,最佳工况点流量 $Q = 15\ \text{m}^3/\text{h}$ 、扬程



图1 自吸泵模型

Fig. 1 Self-priming pump model

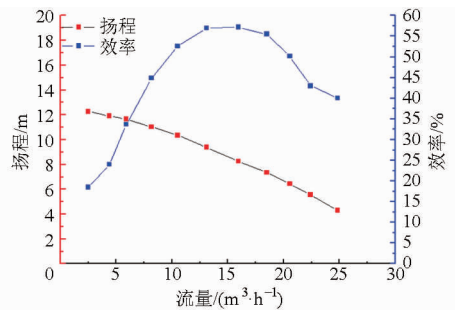


图2 水力性能

Fig. 2 Hydraulic performance

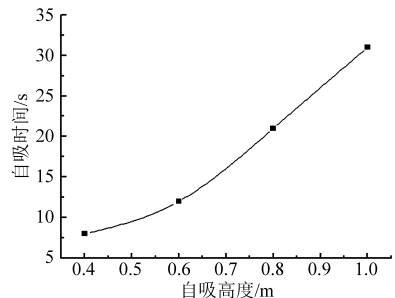


图3 自吸性能

Fig. 3 Self-priming performance

$H = 8.5\ \text{m}$ 。在自吸高度 $H_s = 1\ \text{m}$ 下,自吸时间 $t_s = 31\ \text{s}$ 。因此,选取流量 $Q = 15\ \text{m}^3/\text{h}$ 、扬程 $H = 9\ \text{m}$ 为自吸离心泵自吸过程的可视化研究工况点,对31 s的自吸过程进行动态数据采集以及可视化拍摄记录。

2 试验方法与装置

自吸离心泵自吸过程的动态测试和可视化拍摄同步试验在离心泵闭式试验台上进行,试验装置如图4所示,主要由水箱、阀门、模型泵、变频电动机、高速摄影机、电磁流量计、科氏质量流量计等组成。通过阀门调节流量为 $15\ \text{m}^3/\text{h}$ 左右。

采用变频调速电动机实现自吸离心泵快速启动,启动时间约3 s,启动完成后,转速为 $1\ 800\ \text{r/min}$,进口

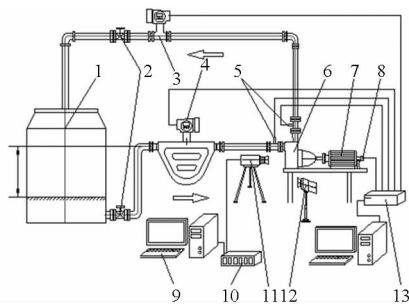


图 4 试验装置示意图

Fig. 4 Diagram of experimental apparatus

1. 水箱 2. 阀门 3. 电磁流量计 4. 科氏质量流量计 5. 压力传感器 6. 模型泵 7. 轴编码器 8. 变频电动机 9. 计算机 10. 信号采集器 11. 高速摄影机 12. LED 光源 13. NI 虚拟仪器

瞬时流量的测量采用科氏质量流量计。科氏质量流量计是基于科里奥利力的原理设计,它可用于流体质量流量的直接测量,重复性好,测量精度高,而且还能同时实现流体的体积流量、密度、温度等多参数和不同流体状况下的测量,具有卓越的稳定性和可靠性^[13]。出口瞬时流量的测量采用电磁流量计,以

实现进、出口流量计之间的性能对比试验。在泵的进、出口处安装压电式压力传感器,在电动机转轴末端安装采集转速的同步器。

LabVIEW 动态测试系统主要由 NI 虚拟仪器、LabVIEW 编程平台和计算机组成。启动电动机后,利用 LabVIEW 自动采集进口、出口压力,进口、出口流量及转速,采集时间间隔为 0.5 s,采集持续到自吸完成、泵连续出水为止。

高速摄影系统采用美国 IDE 公司 Y-Series 4L 型高速摄影机,最大每分钟可拍摄 256 000 帧^[14],本次试验设置的采样频率为 250 Hz,曝光时间为 127 μ s。拍摄时,借助 LED 光源提供辅助光线。

3 试验结果与分析

3.1 动态测试

利用 LabVIEW 动态测试系统实时采集泵进口、出口压力,进口、出口流量及转速。测试结果如图 5 所示。

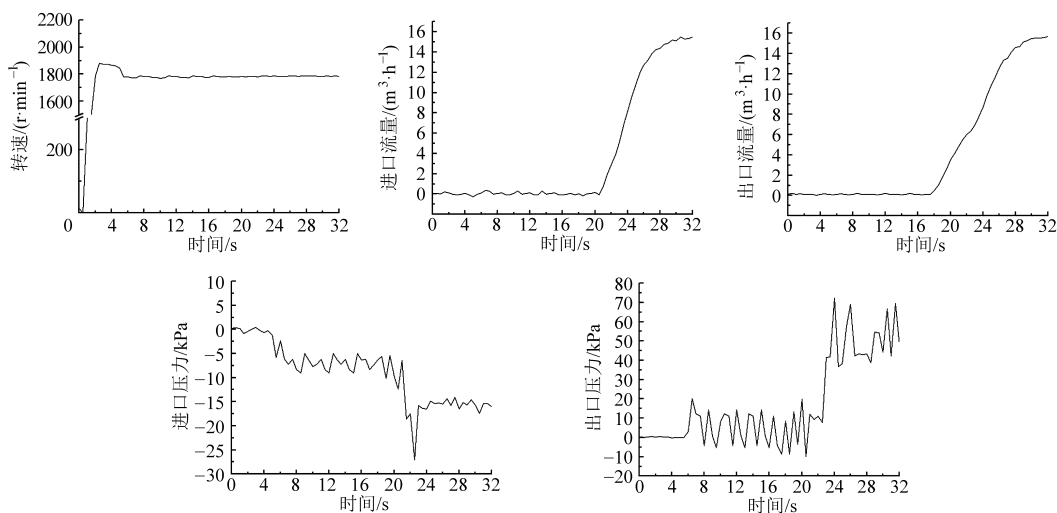


图 5 自吸过程转速、压力、流量变化曲线

Fig. 5 Speed, pressure and flow changing curves during self-priming process

根据泵进口、出口压力,进口、出口流量及转速的变化趋势,将自吸过程分为以下阶段:

(1) 自吸启动过程(0~3 s)。转速在极短的时间内从零先快速上升随后又减小,然后趋于稳定至 1 800 r/min 左右的快速瞬变过程^[15]。此时段,泵进口、出口流量,进口、出口压力几乎为零。

(2) 自吸稳定过程(3~20 s)。转速稳定于 1 800 r/min 左右,泵进口、出口流量为零,泵进口压力在 -10 kPa 左右波动,泵出口压力在 5 kPa 左右波动,且出口压力呈现一定的周期性。这表明在流量未上升之前,自吸过程是一个动态稳定的过程。

(3) 自吸突变过程(20~28 s)。转速维持在 1 800 r/min 左右,泵进口、出口流量急速上升至

15 m^3/h 左右,泵进口压力突变减小,由 -10 kPa 骤减至 -15 kPa 左右,泵出口压力突变增大至 60 kPa,且波动剧烈。

(4) 正常输水过程(28 s 以后)。进、出口流量趋于稳定在 15 m^3/h ,泵进口压力稳定在 -15 kPa 左右,泵出口压力在 60 kPa 附近波动。

在自吸突变过程中,泵出口流量变化趋势与泵进口流量变化基本一致,20 s 时,泵进口流量逐渐缓慢上升,而出口流量在 18 s 时已开始增加,且流量变化趋势较为平缓,说明电磁流量计在气液两相状态下不能实时准确地反映液体流量,有一定的迟滞性,而基于科里奥利力原理设计的科氏质量流量计^[16]具有较好的实时性、准确性。

3.2 高速摄影

试验中,主要对自吸离心泵的叶轮与蜗壳(区域A)、气液分离室、蜗壳出口扩散段(区域B)等区域进行自吸过程的拍摄记录,拍摄区域如图6所示。

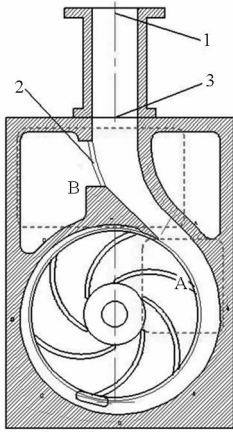


图6 拍摄区域示意图

Fig. 6 Shooting area diagram

1. 泵出口 2. 气液分离室进口 3. 扩散段出口

由于22 s后泵体内液面急速上升,遮挡了高速摄影的拍摄视线,因此,图7所示为0~20 s区域A内气液两相的形态变化,图8所示为0~30 s区域B内气液两相的形态变化^[17-18]。

(1)自吸启动过程(0~3 s)。转速快速上升下,叶轮与蜗壳内形成的气液混合物以一定的速度经扩散管流出,气液混合物因质量力不同被分离,分离出的液体借助流动方向的急剧改变冲击气液分离室内的气体形成无数大小不一的水珠,分离开的气泡开始从泵出口排出。

(2)自吸稳定过程(3~20 s)。叶轮、蜗壳内的

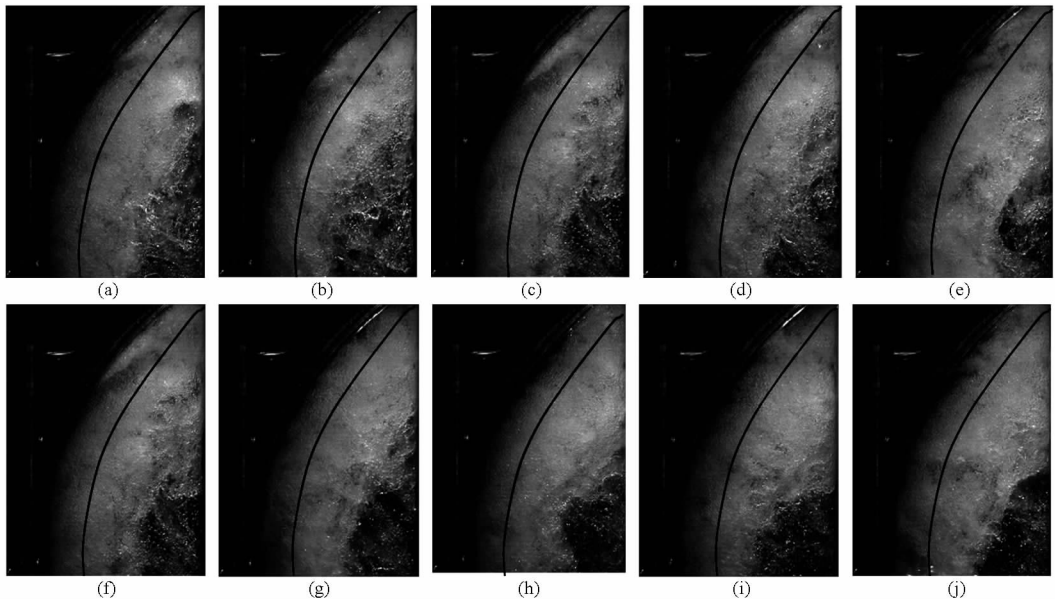


图7 叶轮与蜗壳内自吸过程气液形态变化

Fig. 7 Changing form of water in impeller and volute during self-priming process

(a) 1 s (b) 2 s (c) 3 s (d) 5 s (e) 8 s (f) 10 s (g) 12 s (h) 15 s (i) 18 s (j) 20 s

气泡处于破碎与聚并的动态稳定过程;气液分离室内的气液混合物不再受到强烈扰动,液体处于自由抛射状态,在气液分离室内的小水珠与扩散管中的气泡数目、大小、速度处于相对稳定的平衡状态。

(3)自吸突变过程(20~28 s)。液体流量突增,导致液体与气体碰撞加剧,水珠与气泡数目急剧增多且相互间碰撞剧烈,随后气泡数目又急剧下降,气泡直径也随之减小直至气泡全部排出。

3.2.1 叶轮、蜗壳内气液分布

由图7可以发现,由于叶轮的高速旋转,叶轮进口处形成负压,此时,泵进口管路内的气体进入叶轮,从而在叶轮进口处出现了半径为65 mm左右的气相空穴。在叶轮出口处,气体与随着叶轮高速旋转的液体混合,形成半径为65~92.5 mm稳定的圆环状气液混合物层。

采用阈值方法对图7进行分割灰度处理,以此识别气泡边界,通过计算气泡边缘像素点位置及气泡所占像素面积,可将气泡像素大小转化为实际气泡的尺寸。图9为取样得到的10、15、20 s时叶轮圆环状气液混合物中气泡直径分布。

对试验数据做曲线拟合,得到气泡直径分布大致呈正态分布。

由此可见,在自吸稳定过程中,叶轮内大部分气泡直径分布在0.22~0.58 mm之间,且气泡直径变化范围较小,说明此过程是一个瞬态的相对稳定过程。

3.2.2 气液分离室、扩散段内气液分布

由图8可以发现,气液混合物以一定的速度流

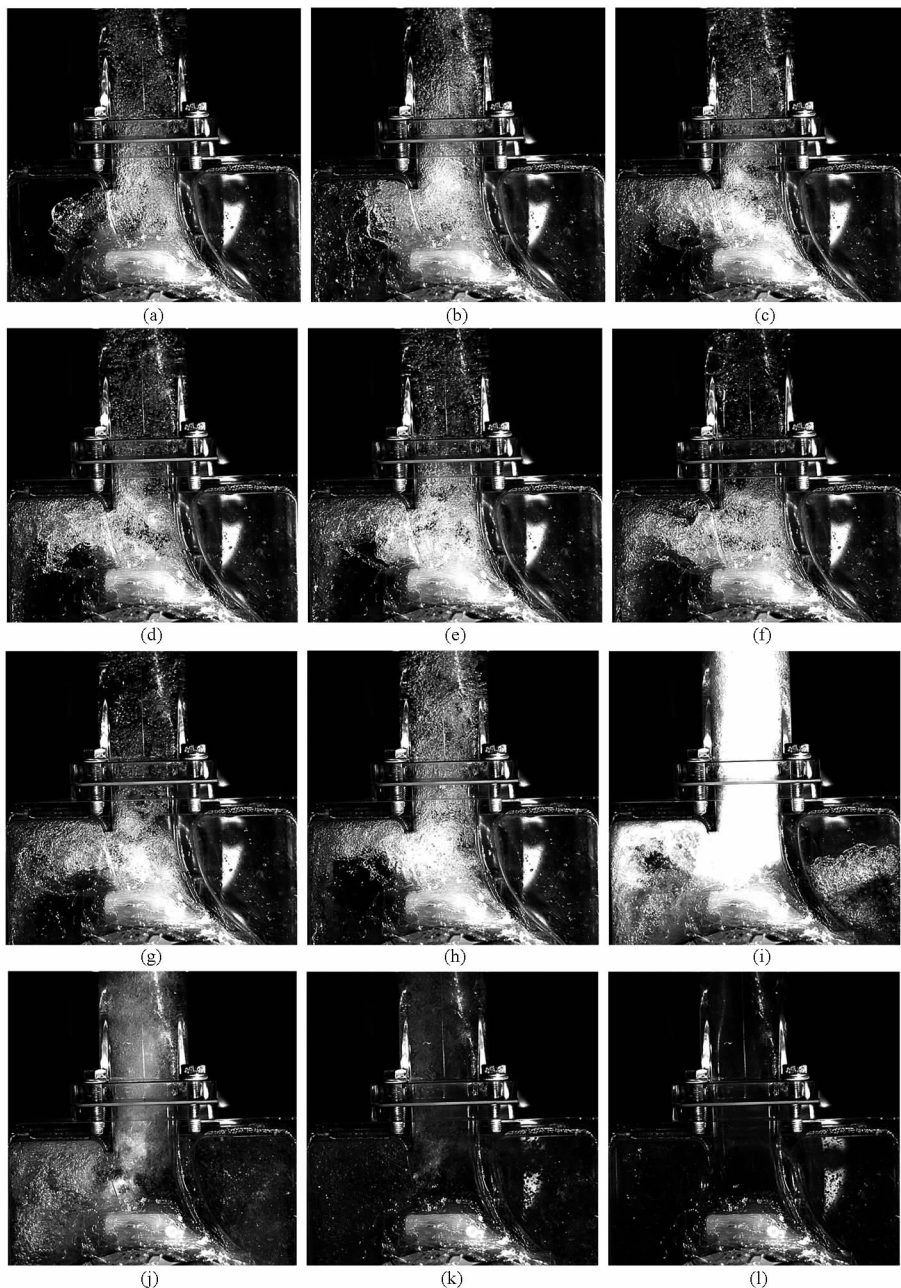


图 8 气液分离室内自吸过程气液形态变化

Fig. 8 Changing form of water in gas-liquid separation chamber during self-priming process

(a) 0.1 s (b) 0.5 s (c) 1 s (d) 3 s (e) 5 s (f) 10 s (g) 15 s (h) 20 s (i) 22 s (j) 25 s (k) 28 s (l) 30 s

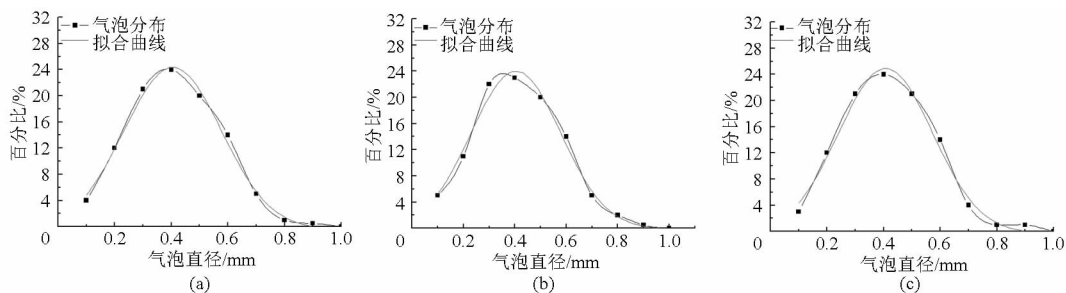


图 9 气泡直径的比例分布

Fig. 9 Proportion distribution of bubble diameter

(a) 10 s (b) 15 s (c) 20 s

经扩散段,因质量力不同和流动方向的改变而被分离,在扩散段出口处,存在着明显的气体与液体

分离现象,其气液分离交界面称为气液分离面。在自吸启动过程,气液分离面波动剧烈,并伴有不

规则的旋转和空腔响声,此时,气液混合物中的气体不易被分离出来。随后的自吸稳定过程对自吸时间长短影响较为重要,在气液分离室内出现了液体的自由抛射状流动,扩散段出口附近出现了稳定的气液分离面。

通过高速摄影,观测到在扩散段处出现了周期性的泡状流漩涡,其气泡群中一部分气泡处于停滞回旋状态,一部分气泡随液流连续排出。图10为取样得到的10、15 s时扩散段内停滞气泡、移动气泡的

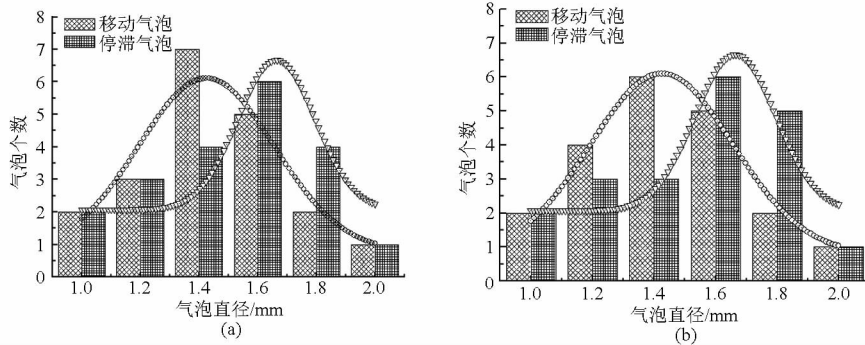


图10 气泡直径的数量分布

Fig. 10 Number distribution of bubble diameter

(a) 10 s (b) 15 s

4 结论

(1) 自吸过程可分为以下阶段:自吸启动过程(0~3 s)、自吸稳定过程(3~20 s)、自吸突变过程(20~28 s)、正常输水过程(28 s以后)。其中,自吸稳定过程的时间最长,影响着自吸时间的长短,这与自吸性能密切相关。

(2) 自吸泵气液分离室内气液两相流形态的微观变化与自吸过程中压力、流量、转速的宏观变化具有一致性。这对寻找自吸气液两相流动状态的变化与自吸性能外特性之间的内在规律具有重要意义。

直径分布以及相应的拟合曲线,由图可得,停滞回旋气泡直径(1.5~1.8 mm)大于移动排出气泡(1.2~1.6 mm)。停止回旋气泡在扩散段出口一直处于聚并与破碎状态,消耗了能量,不利于气泡的及时排出,对自吸性能有不良影响。而在泵出口出现的连续排出的稳定泡状流有利于气体排出。为了使泵具有良好的自吸性能,形成连续的稳定泡状流是必要条件。

(3) 自吸稳定过程中,叶轮外缘形成半径为65~92.5 mm稳定的圆环状气液混合物层,且大部分气泡直径分布在0.22~0.58 mm之间,气泡直径变化范围较小,说明此过程是一个瞬态的相对稳定过程。

(4) 扩散段处出现了周期性的泡状流漩涡,其气泡群中一部分气泡处于停滞回旋状态,一部分气泡随液流连续排出。停滞回旋气泡直径(1.5~1.8 mm)大于移动排出气泡(1.2~1.6 mm)。停止回旋气泡在扩散段出口一直处于聚并与破碎状态,消耗了能量,不利于气泡的及时排出,对自吸性能有不良影响。

参考文献

- 李红,徐德怀,涂琴,等. 自吸泵启动过程气液两相流动的数值模拟[J]. 农业工程学报,2013,29(3):77-83.
Li Hong, Xu Dehuai, Tu Qin, et al. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow of self-priming pump during starting period [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 77-83. (in Chinese)
- 黄思,岳乐,郭京,等. 离心泵自吸过程的气液两相流非稳态数值模拟[J]. 科技导报,2013,31(14):36-40.
Huang Si, Yue Le, Guo Jing, et al. Unsteady numerical simulation for gas-liquid two-phase flow in the self-priming process of centrifugal pump[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(14): 36-40. (in Chinese)
- 李红,徐德怀,李磊,等. 自吸泵自吸过程瞬态流动的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(7):565-569.
Li Hong, Xu Dehuai, Li Lei, et al. Numerical simulation of transient flow in self-priming centrifugal pump during self-priming period[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(7): 565-569. (in Chinese)
- 岳乐. 自吸离心泵内气液两相流计算及性能实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- 李红,王涛,徐德怀,等. 喷灌泵自吸过程瞬态水力特性的试验研究[C]//第四届全国水力机械及其系统学术会议论文集,2011:29-33.
- 仪修堂,兰才有,杨培岭,等. 内混式吸离心泵自吸性能影响因素的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2007,26(5):14-17.
Yi Xiutang, Lan Caiyou, Yang Peiling, et al. Experimental study on influencing factors of self-priming performance of inner-

- recirculation self-priming centrifugal pumps[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(5): 14 – 17. (in Chinese)
- 7 洪江波, 李海涛, 朱锡, 等. 水下爆炸的高速摄影测试技术研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2008, 30(5): 82 – 86.
Hong Jiangbo, Li Haitao, Zhu Xi, et al. High speed photographic investigation of bobble induced by underwater explosion[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008, 30(5): 82 – 86. (in Chinese)
- 8 汪斌, 张光升, 高宁, 等. 高速摄影技术在水下爆炸气泡脉动研究中的应用[J]. *含能材料*, 2010, 18(1): 102 – 106.
Wang Bin, Zhang Guangsheng, Gao Ning, et al. Application of high-speed photography in bubble oscillation at underwater explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(1): 102 – 106. (in Chinese)
- 9 岂斌. 高压共轨燃油喷射雾化特性试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- 10 张德胜, 石磊, 施卫东, 等. 轴流泵叶轮叶顶区空化流的数值模拟与实验研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(3): 335 – 341.
Zhang Desheng, Shi Lei, Shi Weidong, et al. Numerical simulation and experimental study on impeller tip region cavitation in axial flow pump[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(3): 335 – 341. (in Chinese)
- 11 张振福, 曾新吾. 水下冲击波聚焦作用下空化效应的实验研究[J]. *实验流体力学*, 2012, 26(5): 17 – 21.
Zhang Zhenfu, Zeng Xinwu. Experimental study on the cavitation phenomena induced by underwater shock wave focusing[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2012, 26(5): 17 – 21. (in Chinese)
- 12 王涛. 外混式自吸喷灌泵内部流动机理的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- 13 Anklin M, Drahm W, Riedera A. Coriolis mass flowmeters; overview of the current state of the art and latest research[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2006, 17(6): 317 – 323.
- 14 张德胜, 吴苏青, 施卫东, 等. 轴流泵小流量工况条件下叶顶泄漏空化特性[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 68 – 75.
Zhang Desheng, Wu Suqing, Shi Weidong, et al. Characteristics of tip leakage vortex cavitation in axial flow pump at small flow rate condition[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(22): 68 – 75. (in Chinese)
- 15 李志锋, 吴大转, 王乐勤, 等. 离心泵启动过程瞬态特性的试验[J]. *排灌机械工程学报*, 2010, 28(5): 389 – 393.
Li Zhifeng, Wu Dazhuan, Wang Leqin, et al. Experiment on instantaneous characteristics in centrifugal pump during startup period[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(5): 389 – 393. (in Chinese)
- 16 陈善文. 科里奥利质量流量计的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- 17 郑强, 高璞珍, 许超, 等. 窄矩形通道内气泡聚合行为研究[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(6): 1015 – 1019.
Zheng Qiang, Gao Puzhen, Xu Chao, et al. Research on bubble coalescence in narrow rectangular channel[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, 48(6): 1015 – 1019. (in Chinese)
- 18 Xiao Huahua, Sun Jinhua. Experimental and numerical study of premixed hydrogen/air flame propagating in a combustion chamber[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 268: 132 – 139.
- 19 王洋, 李贵东, 曹璞钰, 等. 泵腔内部环流对射流式自吸泵自吸性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 129 – 133.
Wang Yang, Li Guidong, Cao Puyu, et al. Effects of internal circulation flow on self-priming performance of flow-ejecting self-priming pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(11): 129 – 133. (in Chinese)
- 20 王维军, 王洋, 李贵东, 等. 射流自吸式离心泵三维湍流数值模拟与实验分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 54 – 60.
Wang Weijun, Wang Yang, Li Guidong, et al. Numerical simulation and testing analysis of three dimensional turbulence flow in flow-ejecting self-priming centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 54 – 60. (in Chinese)