

隔舌间隙对自吸离心泵自吸性能的影响

李红 陆天桥 詹连辰

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为分析隔舌间隙对泵自吸性能的影响及其原因,进一步掌握泵的自吸机理,对外混式自吸离心泵在不同隔舌间隙时的自吸过程进行了高速摄影试验,通过图像处理技术研究蜗壳扩散段内气泡的数量、大小及运动轨迹,同时测量自吸完成时间。研究表明,自吸过程中扩散段靠近气液分离室左侧区域的气泡呈现小而密的特点,右侧区域的气泡呈现大而疏的特点。直径较小的气泡在蜗壳扩散段出口更容易被排出,较大的气泡在扩散段内振荡、回旋,不利于自吸的完成。当隔舌间隙从 1.0 mm 增加到 2.5 mm 时,经过隔舌进入扩散段的气泡平均直径从 1.2 mm 增加到 1.9 mm,自吸完成时间从 28 s 上升到 113 s,即隔舌间隙越小,进入蜗壳扩散段的气泡直径越小,这是减小隔舌间隙自吸时间缩短的微观机理。

关键词: 自吸离心泵; 隔舌间隙; 自吸性能; 高速摄影

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0141-07

Influence of Gap between Impeller and Tongue on Centrifugal Pump Self-priming Performance

LI Hong LU Tianqiao ZHAN Lianchen

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

Abstract: The high-speed photography system was built to investigate the self-priming process of external mixing self-priming pump to analyze the influence of gap between impeller and tongue on self-priming performance of pumps, and then further grasp the self-priming mechanism. The digital images processing technique based on Matlab was applied to compute the number, average diameter and motions of bubbles in the area of diffuser. The tongue gap was resized and the self-priming time was measured to research the internal relations between the bubbles characteristics and self-priming mechanism. The results show that self-priming process is a complicated unsteady gas – liquid two phase flow and always accompanied by generation, collapse, gathering and splitting of bubbles. During the self-priming process, bubbles in the left area of diffuser are smaller and denser, which are easier to be discharged out of the pump. On the contrary, bubbles in the right area vibrate and rotate, which goes against self-priming and wastes energy. When the gap is increased from 1.0 mm to 2.5 mm, the average diameter of bubbles in the diffuser is increased from 1.2 mm to 1.9 mm and the self-priming time is increased from 28 s to 113 s. It means that the bigger the gap is, the bigger diameter of bubbles from tongue to diffuser will be and the longer the self-priming time will be.

Key words: self-priming centrifugal pump; tongue gap; self-priming performance; high-speed photography

引言

自吸离心泵是一种特殊的离心泵,除首次启动需要对泵体进行灌水外,以后启动都能自行排出进水管内的空气,完成自吸过程。自吸离心泵具有操

作方便、适应性强等优点,特别是启动频繁、流动作业、灌液困难的场合^[1-4]。根据水和气体混合位置的不同可将自吸泵分为外混式和内混式 2 种,本文以国内应用广泛的 65ZB-40C 型外混式自吸离心泵作为研究对象。

收稿日期: 2016-11-07 修回日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679109)

作者简介: 李红(1967—),女,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

目前,国内外很多学者专注于自吸离心泵自吸机理的研究,孔祥云^[5]通过试验把自吸过程气水边界层外侧的气泡分为停滞气泡和移动气泡,明确了停滞气泡对自吸性能的不良影响。沙毅等^[6-8]通过试验对比分析了自吸泵叶轮型式和隔舌间隙对自吸性能的影响,并对自吸过程的流场进行了分析,提出了提高自吸性能的方法。仪修堂等^[9-10]对内混式自吸离心泵射流自吸装置进行了试验,分析了自吸过程中吸水管和叶轮进口真空度的变化情况,以及射流嘴几何参数对自吸性能的影响。MINEMURA等^[11]采用气泡流模型对离心泵内气液两相流进行了数值模拟,并通过试验验证。刘建瑞等^[12-13]采用 Mixture 模型、Realizable 模型与 SIMPLEC 算法,对内混式自吸离心泵自吸过程进行了模拟,得到不同含气率下流场的压力、速度和气相分布。上述研究大多通过试验来分析泵的水力结构对泵外特性以及自吸性能的影响,或者通过数值模拟分析自吸离心泵的自吸过程,很少涉及隔舌间隙等水力结构的变化对自吸性能产生影响的微观机理分析以及自吸过程中气液两相流的变化过程与自吸性能、自吸机理之间的内在联系。

文献[14-15]注重于泵自吸过程气液两相流的数值模拟,并进行了可视化试验初步研究。本文进一步分析气液分离室和扩散段内气泡的数量、大小及运动轨迹,通过改变泵的隔舌间隙进行自吸性能试验和气泡内部流动分析,从自吸机理上研究隔舌间隙对自吸性能的影响,以及与自吸性能、自吸机理之间的内在联系。

1 材料和方法

1.1 自吸性能高速摄影试验装置

高速摄影试验在江苏大学国家水泵中心实验室进行。试验台由自吸离心泵、高速摄影系统、压力传感器、流量计、电动机、水箱等组成,如图 1 所示。自吸离心泵是由叶轮、蜗壳、S 型弯管、气液分离室、储液室等关键部件组成的有机玻璃结构,初始状态时泵的进口管以下为水,以上为气体,叶轮完全浸没在水里。选取叶轮转速为 1 800 r/min 时的最佳工况点(流量 15 m³/h、扬程 9 m)作为高速摄影的研究工况点^[16]。高速摄影系统由高速摄影机、计算机和 LED 光源组成,其中高速摄影机选自美国 IDT 公司,型号为 Y-Series 4L。为了清晰地拍摄到自吸过程中叶轮流道、蜗壳及气液分离室内气液两相流态以及气泡的变化,试验在晚上进行,保证除了 LED 光源照射拍摄区域以外无其他光源干扰,拍摄频率为 500 帧/s。

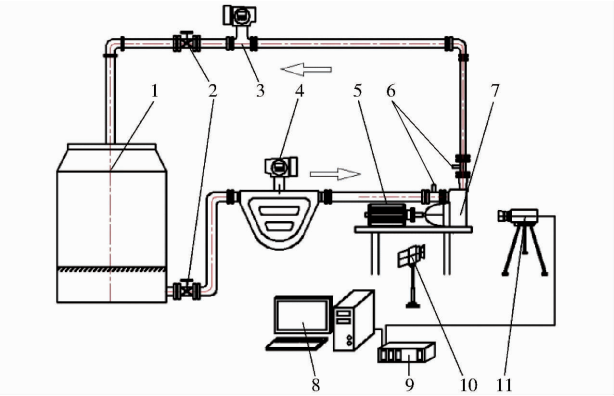


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental apparatus

1. 水箱 2. 阀门 3. 电磁流量计 4. 科式质量流量计 5. 电动机 6. 压力传感器 7. 自吸离心泵 8. 计算机 9. 信号采集器 10. LED 光源 11. 高速摄影机

1.2 隔舌改变装置

隔舌间隙是指蜗壳最小半径与叶轮出口半径之差。已有的泵自吸性能的研究发现,影响泵自吸性能最重要的水力结构尺寸主要是:隔舌间隙、叶轮外径线速度等。为了研究影响泵自吸性能最重要的水力参数——隔舌间隙对自吸性能的影响,本研究设计了隔舌板,即一个可移动的与泵体分开的单独部件,如图 2 所示。在隔舌板上打 2 个腰圆孔,通过螺栓固定在泵体上,松开螺栓后隔舌板可以上下移动。自吸性能试验时,移动隔舌板位置调节叶轮与隔舌的间隙。

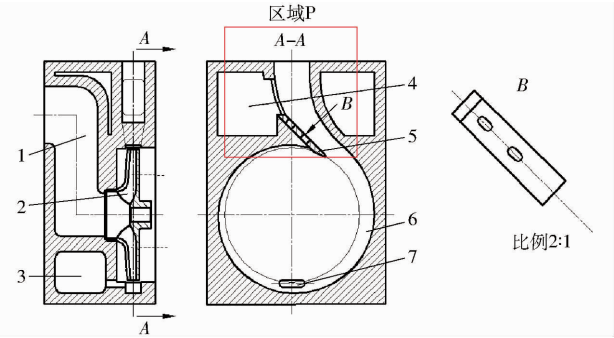


图 2 自吸泵结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of self-priming pump

1. S 型弯管 2. 叶轮 3. 储液室 4. 气液分离室 5. 隔舌板 6. 蜗壳 7. 回流孔

1.3 图像处理方法

1.3.1 图像的预处理

高速摄影拍摄到的图像信息复杂,部分需要进行筛选和预处理来获取气泡信息,本文采用二值化、中值滤波等预处理方法^[17-18]。中值滤波采用 medfilt2 函数,其原理是把区域的像素按灰度进行排序,取灰度中值作为当前像素的灰度,计算公式为

$$g(x,y) = \text{med}(f(x-k,y-i)) \quad (k,i \in W) \quad (1)$$

式中 $f(x,y)$ ——原始图像
 $g(x,y)$ ——处理后的图像
 $\text{med}(\)$ ——取中值函数
 W ——二维模板

图像的二值化采用 `im2bw` 函数,其原理是通过设定一个阈值,把所有像素点的灰度变成 0 或 255,计算公式为

$$f(x,y)=\begin{cases} 255 & (g(x,y)\geq T_h) \\ 0 & (g(x,y)<T_h) \end{cases} \tag{2}$$

其中 T_h 是设定的阈值,这里采用迭代法求出图像的最佳阈值,首先用图像的平均灰度作为初始阈值把图像进行分割,然后根据不同区域的权重求出新的图像阈值,再用这一阈值对新的图像进行分割,如此迭代直到新的阈值与上一阈值之差小于规定值。二值化后的图像中白色气泡能够被黑色的背景突出,方便之后的观察和计算,如图 3 所示。

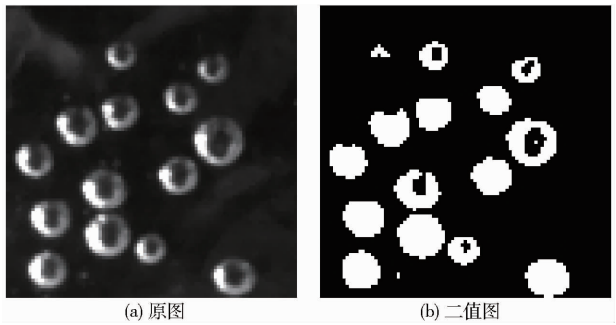


图 3 图像处理效果
Fig.3 Effects of image processing

1.3.2 气泡的大小、数量和运动轨迹

气泡的大小和数量通过 `bwlabel` 函数计算得到,其原理是标记二值图像矩阵中的连通域,即在黑色的二值图背景中甄别出白色的气泡,每一个气泡即一个连通域,算法为

$$(L,n)=b(B,n_0) \tag{3}$$

式中 $b(\)$ ——`bwlabel` 函数
 B ——二值图像矩阵
 n_0 ——一般为 4 或者 8,表示按照 4 连通或者 8 连通的方式寻找区域
 n ——得到的连通域个数,即气泡的个数
 L ——返回得到的与 B 大小相同的矩阵,包含了 B 中每个连通域的分类标签,通过统计 L 矩阵中相同标签的数量得到气泡的像素大小

气泡直径的计算公式为

$$d=\sqrt{\frac{4S}{\pi}} \tag{4}$$

式中 d 的单位是像素,按照尺寸标定换算成毫米,1 016 像素对应的实际尺寸是 135 mm, S 表示连通

域像素面积。通过 `mean` 函数可以得到连通域内所有点坐标的算术平均值即气泡的形心坐标,输入到 Origin 软件得到气泡的运动轨迹^[19]。

2 结果和讨论

2.1 自吸过程

隔舌间隙为 1 mm 时自吸过程泵内的气液两相流态变化由高速摄影系统记录下来,随着电动机的启动,叶轮转速上升并稳定在 1 800 r/min,在叶轮进口处形成的负压使得管道内的空气与泵体内的水混合,如图 4 所示,叶轮流道内充满大小不一的气泡从叶轮进口向叶轮出口运动,并在叶轮外缘处形成一个半径 65 ~ 93 mm 的稳定圆环状气液混合层,如图 5 所示,红线代表叶轮外缘。这一混合层经过隔舌时被打破,形成比较均匀的气液两相流,一部分进入气液分离室,另一部分直接进入泵出口排出泵体,进入气液分离室的气液混合物进行气液分离,分离出的气体经扩散段排出泵体,液体通过回流孔回流到叶轮外缘,继续参与循环。随着管道和泵体内的气体全部被排出,到 28 s 时自吸完成^[20]。



图 4 自吸过程叶轮的高速摄影图
Fig.4 High-speed image of the impeller

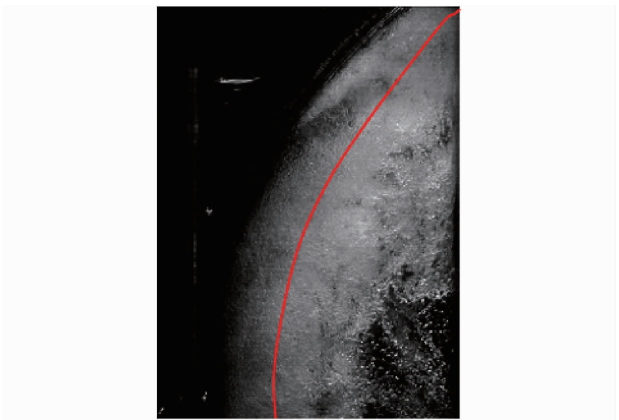


图 5 叶轮外缘的气液混合层
Fig.5 Gas - liquid mixing layer at outer edge of the impeller

图 6 是自吸过程不同时间点气液分离室和蜗壳扩散段的高速摄影图像(图 2 中区域 P)。图 6a 是电动机刚启动时,气液两相流还没有进入气液分离

室。图 6b、6c 这一过程中气液分离室内稳定地进行着气液分离,并在中间形成一个气相空穴。之后自吸突变,从泵出口排出的气泡数量骤增,气液分离室内的气相空穴消失,不再进行气液分离,如图

图 6d 所示。随着管路内的气体越来越少,自吸即将完成,如图 6e 所示,此时气液分离室和泵体即将充满水。图 6f 中泵体内的空气基本被排光,自吸已经完成,泵正常输水。

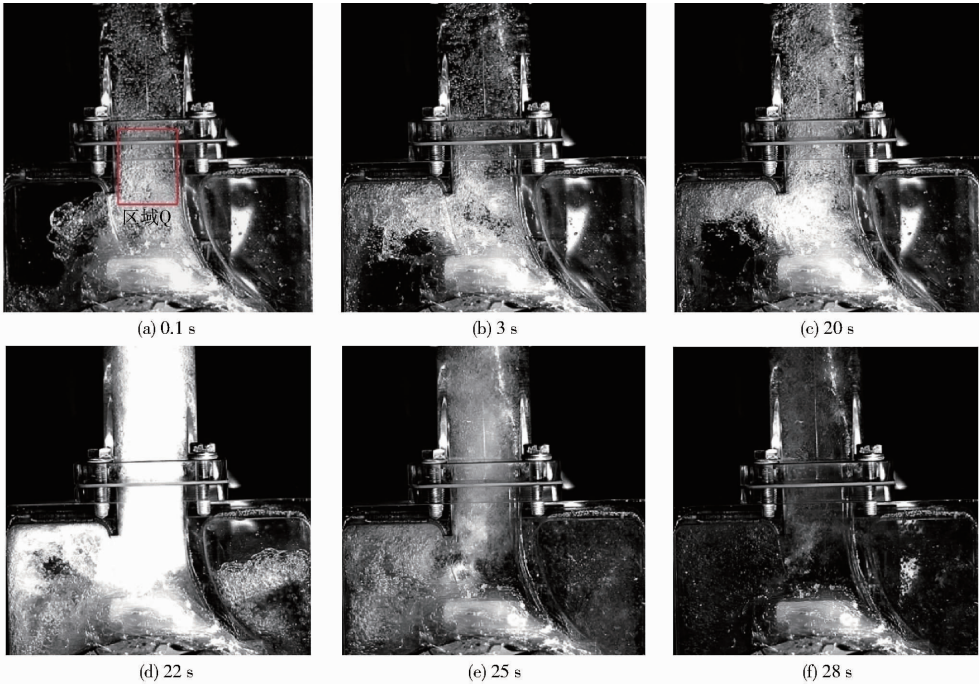


图 6 自吸过程中气液分离室和蜗壳扩散段的高速摄影图

Fig. 6 High-speed images of gas – liquid separation chamber and diffuser during the self-priming process

2.2 蜗壳扩散段内气泡分布

为了通过微观的气泡特性分析不同隔舌间隙对泵自吸性能的影响,首先要研究某一间隙下经过隔舌进入蜗壳扩散段内的气泡规律。图 7 截选自图 6a 中区域 Q,是隔舌间隙为 1 mm、自吸开始 15 s 时段内气泡的分布图。选取左右两边 100 像素 × 100 像素区域(图中红色方框内区域),计算该区域内气泡的个数和平均直径,一半在该区域内的气泡在图像中也是一个连通域,算作一个气泡。得到该时刻左边区域的气泡个数为 45,平均直径为 1.2 mm。右边区域的气泡个数为 26,平均直径为 1.9 mm,即蜗壳扩散段内靠近气液分离室左边区域的气泡相比于右边区域的气泡尺寸小、数量大。选择泵自吸过程其他时刻的高速摄影图片进行计算,同样符合这样的规律。

探究气泡的运动规律,将自吸开始后 15 s 到 15.014 s 时间段内的扩散段气泡分布图进行图像处理,每张图的间隔时间为 0.002 s,去除背景选取左右的气泡 D、E、F、G 分析其运动,如图 8 所示,其中图 8a 是由图 7 处理得到的。计算这些气泡不同时刻的形心坐标,并在一个坐标轴上表示出来,如图 9、10 所示,其中横坐标是图像水平方向的像素位置,纵坐标是图像竖直方向的像素位置。可以发现

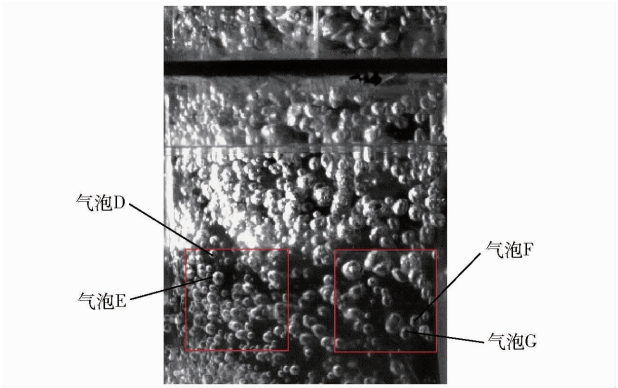


图 7 自吸过程蜗壳扩散段内气泡分布的局部放大图

Fig. 7 Partial enlarged image of bubble distribution in diffuser during the self-priming process

左边的气泡 D 和 E 迅速向上运动排出泵体即所谓的移动气泡,而右边气泡 F 和 G 在扩散段内回旋运动、上下振荡,即所谓的停滞气泡,这些气泡的存在阻碍了移动气泡的排出,延长了自吸时间。

由此可见,小而密的气泡群聚集在蜗壳扩散段左边,能够迅速地排出泵体;大而疏的气泡群在蜗壳扩散段内停滞的时间较长。即减小从泵体隔舌出来的气泡大小是缩短泵自吸时间,提高泵自吸能力的一个有效途径。

2.3 隔舌间隙对自吸性能的影响

改变隔舌板位置,调节叶轮与隔舌间隙分别为

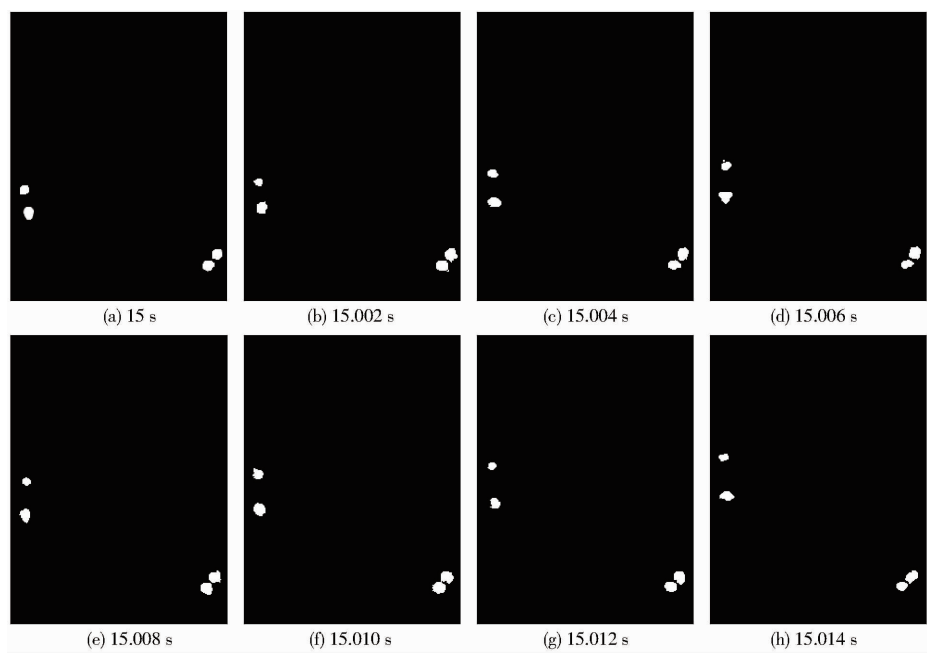


图 8 蜗壳扩散段内气泡运动图

Fig.8 Moving bubbles in diffuser during the self-priming process

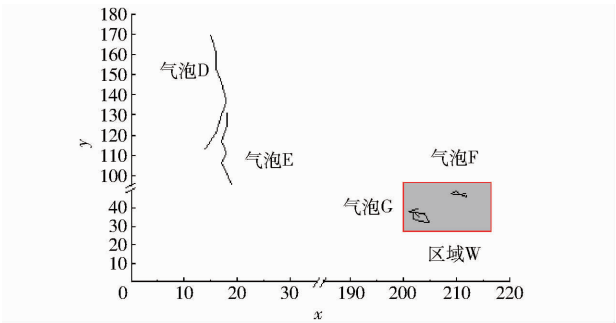


图 9 气泡的运动轨迹

Fig.9 Trajectories of bubbles

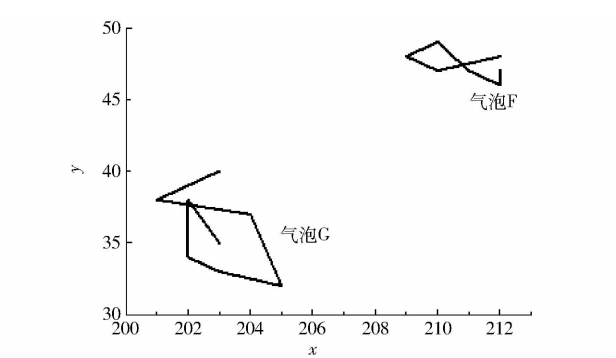


图 10 区域 W 放大图

Fig.10 Enlarged view of area W

1.0、1.5、2.0、2.5 mm 进行自吸性能试验。自吸完成时间以出口流量达到泵正常输水状态下的流量为准,每一种隔舌间隙测试 3 次,结果取其平均值。

图 11 为不同隔舌间隙对应的自吸离心泵自吸完成时间,可以发现隔舌间隙为 1.0、1.5、2.0、2.5 mm 对应的自吸完成时间分别为 28、35、47、113 s,自吸时间随着隔舌间隙的增大呈指数式上升,隔舌间隙越小自吸性能越好,这与传统的自吸离

心泵设计理论相吻合。试验中,如果间隙小于 1.0 mm,自吸泵会产生很大的噪声,这是因为气液混合物经过隔舌时会造成阻塞产生振动。间隙大于 2.5 mm 时,自吸将难以完成。

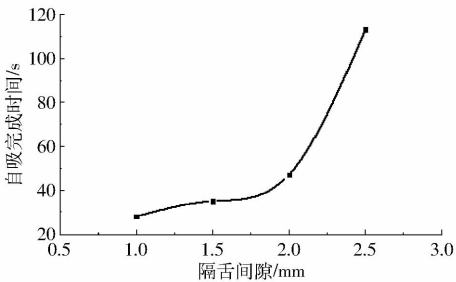


图 11 自吸时间随隔舌间隙的变化曲线

Fig.11 Variation of self-priming time

图 12 是隔舌间隙分别为 1.0、1.5、2.0、2.5 mm 时自吸过程扩散段内气泡分布,计算图中红色方框圈出的 100 像素 × 100 像素区域内气泡的平均直径,得到气泡直径依次为 1.2、1.2、1.3、1.9 mm,这表明隔舌间隙越大,从隔舌进入蜗壳扩散段的气泡直径越大。当隔舌间隙大于 2.5 mm 时,从高速摄影试验结果可以看出,平均直径大于 2 mm 的气泡群在蜗壳扩散段和泵体出口处随液流上下振荡,没有进入出口管道排到水箱中,出口管道上的电磁流量计读数恒为零,自吸泵已经完全丧失了自吸能力。此时气液分离室没有气相空穴的形成,不再承担气液分离的作用,只是作为巨大的泄漏损失存在,气液两相流进入气液分离室马上回流到叶轮出口,如此循环。

由此可见,隔舌间隙越小,经过隔舌进入蜗壳扩

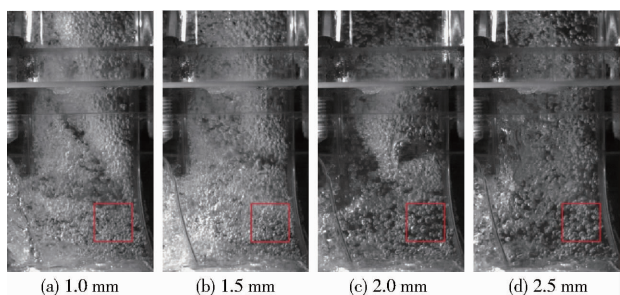


图 12 不同隔舌间隙下扩散段内气泡分布

Fig. 12 Distribution of bubbles in the diffuser

散段的气泡直径越小,形成的气泡群越容易排出泵体,这是试验所得到的减小隔舌间隙、自吸时间缩短这一规律的微观机理。

3 结论

(1) 经过隔舌进入蜗壳扩散段的气泡大小比较均匀,但由于气泡的聚并和分裂,在扩散段出口的气

泡大小不一。自吸开始 15 s 时,扩散段左边 100 像素 × 100 像素区域内的气泡个数为 45,平均直径为 1.2 mm,而右边区域的气泡个数为 26,平均直径为 1.9 mm,这说明自吸过程中扩散段左边区域的气泡呈现小而密的特点,右边区域的气泡呈现大而疏的特点。

(2) 小气泡在扩散段出口迅速向上运动,很容易排出泵体,形成移动气泡。大气泡震荡回旋,不利于自吸过程的进行,即所谓的停滞气泡。减小从隔舌出来的气泡大小是缩短自吸离心泵自吸时间,提高自吸性能的重要手段。

(3) 当自吸泵叶轮与隔舌的间隙从 1.0 mm 增加到 2.5 mm 时,经过隔舌进入扩散段的气泡平均直径从 1.2 mm 增加到 1.9 mm,自吸完成的时间从 28 s 上升到 113 s。这说明隔舌间隙越大,从隔舌进入蜗壳扩散段的气液两相流中的气泡越大,越不容易排出泵体,自吸时间越长。

参 考 文 献

- 袁寿其,施卫东,刘厚林,等. 泵理论与技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.
- 袁寿其,李红,王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. 排灌机械工程学报,2015,33(1):78-92.
YUAN Shouqi, LI Hong, WANG Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(1): 78-92. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):129-133. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141120&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.020.
WANG Yang, LI Guidong, CAO Puyu, et al. Effects of internal circulation flow on self-priming performance of flow-ejecting self-priming pump[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 129-133. (in Chinese)
- 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/OL]. 农业机械学报,2014,45(3):54-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140310&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.03.010.
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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 54-60. (in Chinese)
- 孔祥云. 自吸泵的内部流动[J]. 农业情报资料,1982(7):26-28.
- 沙毅,杨敏官,赵斌娟,等. 自吸泵叶轮型式及隔舌间隙对性能的影响[J]. 水泵技术,2002(4):9-11,31.
- 沙毅,施卫东,康灿. 提高农用自吸泵性能的实验研究及设计方法[J]. 中国农村水利水电,2005(1):84-87,91.
SHA Yi, SHI Weidong, KANG Can. Experimental research and design method of improving the performance of self-abstraction pump used in agriculture[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(1): 84-87, 91. (in Chinese)
- 沙毅,喻彩丽. 自吸旋流泵的试验研究[J]. 浙江科技学院学报,2010,22(4):262-265.
SHA Yi, YU Caili. Experimental investigation of self-priming vortex pump[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2010, 22(4): 262-265. (in Chinese)
- 仪修堂,兰才有,窦以松,等. 内混式自吸离心泵射流自吸装置的试验研究[J]. 水利学报,2006,37(11):1384-1388.
YI Xiutang, LAN Caiyou, DOU Yisong, et al. Experimental study on shooting self-priming device of self-priming centrifugal pump with inner recirculation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1384-1388. (in Chinese)
- 仪修堂,兰才有,杨培岭,等. 内混式自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)
- MINEMURA K, UCHIYAMA T. Three-dimensional calculation of air-water two-phase flow in centrifugal pump impeller based on a bubbly flow model[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1993, 115(4):766-771.
- 刘建瑞,苏起钦. 自吸泵气液两相流数值模拟分析[J]. 农业机械学报,2009,40(9):73-76.
LIU Jianrui, SU Qiqin. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow in self-priming pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 73-76. (in Chinese)

- 13 刘建瑞,向宏杰,刘亮亮,等. 叶轮几何参数对自吸泵自吸性能影响的数值分析[J]. 中国农村水利水电,2012(2):90-93.
LIU Jianrui, XIANG Hongjie, LIU Liangliang, et al. A numerical analysis of the impact of impeller geometric parameters on self-suction performance of self-priming pumps[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(2): 90-93. (in Chinese)
- 14 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)
- 15 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)
- 16 李红,姜波,陆天桥. 泵自吸过程气液两相流的可视化试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(8):59-65. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150810&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.010.
LI Hong, JIANG Bo, LU Tianqiao. Visualization experiment of gas-liquid two-phase flow of pump during self-priming process[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 59-65. (in Chinese)
- 17 周云龙,宋连壮,周红娟. 基于图像处理的气固流化床中气泡行为的分析[J]. 化工自动化及仪表,2011,38(1):60-64.
ZHOU Yunlong, SONG Lianzhuang, ZHOU Hongjuan. Bubble behavior analysis in gas-solid fluidized bed based on image processing technology[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(1): 60-64. (in Chinese)
- 18 宗思光,王江安,王辉华. 光击穿液体空泡特性的高速图像测量[J]. 光学学报,2009, 29(8):2197-2202.
ZONG Siguang, WANG Jiang'an, WANG Huihua. Image measure of characters of cavitation bubble by optical breakdown[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2197-2202. (in Chinese)
- 19 张建伟,杨坤涛,宗思光,等. 水中气泡运动特性及测量[J]. 红外技术,2011,33(4):219-225.
ZHANG Jianwei, YANG Kuntao, ZONG Siguang, et al. Investigation and measurement of bubble characteristic in waters[J]. Infrared Technology, 2011, 33(4): 219-225. (in Chinese)
- 20 王川,施卫东,蒋小平,等. 基于多目标模糊优化的低比转数多级自吸喷灌泵研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):51-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.007.
WANG Chuan, SHI Weidong, JIANG Xiaoping, et al. Design of low-specific-speed multistage self-priming spray irrigation pump based on multi-objective fuzzy optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 51-58. (in Chinese)

(上接第 133 页)

- 21 汪家琼,蒋万明,孔繁余,等. 基于 Particle 模型固液两相流离心泵流场数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(10): 846-850.
WANG Jiaqiong, JIANG Wanming, KONG Fanyu, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in centrifugal pump based on Particle model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(10): 846-850. (in Chinese)
- 22 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016, 47(2):1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160201. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.001.
WANG Fujun. Research progress of computational model for rotating turbulent flow in fluid machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):1-14. (in Chinese)
- 23 MESSA V, MALAVASI S. Numerical prediction of dispersed turbulent liquid-solid flows in vertical pipes[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(5):684-692.
- 24 YANG C, DONG F, CHENG X. Numerical investigation of sediment erosion to the impeller in a double-suction centrifugal pump[C]//6th International Conference on Pumps and Fans with Compressors and Wind Turbines, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2013,52:062004.
- 25 王福军,姚志峰,杨魏,等. 双吸离心泵叶轮交替加载设计方法[J/OL]. 农业机械学报,2015, 46(6): 84-91. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150613. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.013.
WANG Fujun, YAO Zhifeng, YANG Wei, et al. Impeller design with alternate loading technique for double-suction centrifugal pumps[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 84-91. (in Chinese)
- 26 王志高,陈星,何成连. 水泵磨蚀及减阻节能[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.