

混流泵启动过程空化特性的试验研究

陈宗贺¹, 施卫东^{1,2*}, 张德胜¹, 张俊杰³, 张智伟¹

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019; 3. 上海市质量监督检验技术研究院, 上海 200072)



陈宗贺

摘要:为了研究混流泵在不同流量和不同进口压力工况下启动过程中的空化特性,采用不同的启动时间,对一台叶顶间隙为0.25 mm的混流泵模型的启动过程进行了高速摄影试验研究。主要研究了模型在4种流量($0.80Q_d$, $0.90Q_d$, $1.00Q_d$ 和 $1.05Q_d$)工况下,启动时间为10, 15, 20 s下的空化现象。试验结果表明:在混流泵启动过程中,初始阶段由于速度很小,压力没有达到水的气化压力,因此没有出现空化现象;当启动时间达到稳定点后,首先在叶轮叶顶处出现了空泡,随后扩散至叶轮流道,发生严重空化;在相同流量下,泵的进口压力越小(即空化数越小),空化发生得越严重;在进口压力和流量相同时,不同的启动时间下,模型泵在启动过程中,泵内的空化程度随着时间逐渐发展加剧,达到稳态时,空化最为严重。

关键词:混流泵;启动;空化;空泡;高速摄影

中图分类号:S277.9; TH311 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-8530(2019)09-0758-05

Doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.17.0241

陈宗贺, 施卫东, 张德胜, 等. 混流泵启动过程空化特性的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(9):758-762.

CHEN Zonghe, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Experimental study on cavitation characteristics of mixed-flow pump during startup[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2019, 37(9):758-762. (in Chinese)

Experimental study on cavitation characteristics of mixed-flow pump during startup

CHEN Zonghe¹, SHI Weidong^{1,2*}, ZHANG Desheng¹, ZHANG Junjie³, ZHANG Zhiwei¹

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China; 3. Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research, Shanghai 200072, China)

Abstract: A high-speed photographic experiment was carried out on a mixed-flow pump with 0.25 mm tip clearance during its startup period to study cavitation characteristics of the pump at various flow rates, inlet pressures and startup times. The cavitation phenomena in the pump were observed at $0.80Q_d$, $0.90Q_d$, $1.00Q_d$ and $1.05Q_d$ flow rates and 10 s, 15 s and 20 s startup times. The results show that during the initial stage of startup process, since the rotating speed is so low that the pressure in the impeller eye does not reach the saturated vapor pressure of water, no cavitation appears at all. As startup process arrives at its stable stage, cavitating bubbles appear at the impeller tip firstly, then propagate into impeller passages resulting in severe cavitation. At the same flow rate, the lower the inlet pressure (cavitation number) is, the more serious cavitation occurs. At the same inlet pressure and flow rate, the degree of cavitation in the pump is gradually intensified with startup advancing, and the most serious degree of cavitation occurs in the stable stage at different startup times.

收稿日期: 2017-11-05; 修回日期: 2018-01-13; 网络出版时间: 2018-03-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180320.1438.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579118)

第一作者简介: 陈宗贺(1994—),男,江苏徐州人,硕士研究生(chzoh@163.com),主要从事流体机械及工程研究。

通信作者简介: 施卫东(1964—),男,江苏南通人,研究员,博士生导师(wdshi@ujs.edu.cn),主要从事流体机械及工程研究。

Key words: mixed-flow pump; startup; cavitation; bubble; high-speed photography

混流泵兼有离心泵和轴流泵的特点,其结构简单,高效区宽,使用方便,广泛应用于农业灌溉、市政给排水、大规模调水工程等国民经济领域,中国部分潜射武器发射装置也有采用混流泵发射系统^[1].近年来,对混流泵的研究不再局限于稳定工况运行.在加速流工况运行时,混流泵的转速、扬程和流量等参数均发生剧烈变化,流动状态历经层流、转捩和湍流,泵内的叶顶间隙流、叶顶泄漏涡、叶道涡等流动结构交互作用,流动机理极其复杂.

国内外学者对混流泵在启动过程的特性研究较少,主要有数值模拟和试验研究2种手段,目前有关试验研究主要集中在外特性方面,而关于内流场方面的试验进展仍非常缓慢.王乐勤等^[2]对混流泵开机启动过程进行了试验研究,得到了混流泵在启动过程中瞬态水力特性的数学表达式.何志霞等^[3]采用高速数码摄影和长工作距离显微成像技术,对单孔孔板中心孔内和孔板下游进行空化特性试验研究,分析了背压、空化数等参数对孔板水力空化的影响.孙帅辉等^[4]运用动网格技术对涡旋式液泵不同转速下的空化特性进行了数值模拟,获得了空化发生位置和强度随转速的变化规律.李伟等^[5-6]以瞬态外特性试验性能参数为依据,计算获得了混流泵准稳态的外特性曲线和量纲一化的扬程瞬态性能曲线,并建立了混流泵准稳态和瞬态启动内部流场的数值计算方法和叶轮转子动态特性的耦合模型.席光等^[7]研究了混流泵的内部流场、叶轮转动过程中的内部流动机理及流场中可能出现的二次流现象.FERNANDEZ等^[8]采用动网格技术对混流泵叶轮和导叶进行了耦合计算,发现非定常数值计算方法可以有效地模拟混流泵内部的复杂流动现象.NAGAHARA等^[9]采用高速摄影技术和PIV技术对混流泵进口处的旋涡运动和速度场分布进行了试验研究,得出了旋涡运动和旋涡强度对水力性能的影响规律.

为进一步研究混流泵在启动过程中的空化特性,文中搭建混流泵瞬态特性测试试验台,在外特性试验的基础上进行高速摄影试验,拍摄模型泵在启动过程中,不同流量、进口压力以及启动时间下,叶轮和流道内部流场的空化形态,从而揭示混流泵在启动过程中流场空化的演化规律及其内部流动特性.

1 试验

1.1 试验装置

高速摄影试验在Φ250 mm 不锈钢混(轴)流泵闭式试验台上进行,试验系统主要由涡轮流量计、流量调节阀、增压泵、真空泵、进出口测压管、交流电动机、变频器、转矩转速仪、稳压罐以及泵试验段等组成,如图1所示.

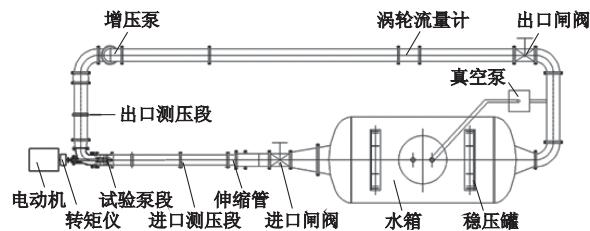


图1 Φ250 mm 不锈钢混(轴)流泵试验台

Fig.1 Test rig with stainless steel pipeline for mixed- or axial-flow pumps with Φ250 mm diameter

在模型泵段进口、出口位置各安置一个压力变送器以进行扬程测量,其中进口测量用压力变送器测量范围为-100~100 kPa,精度为0.2;出口测量用压力变送器测量范围为0~600 kPa,精度为0.2.流量测量采用公称压力为1.6 MPa,精度为0.5的涡轮流量传感器.试验参数采集系统为江苏大学TP自动化研发中心自主研发的TPAM-V(转矩型)泵产品测量仪.同时,在转轮一侧布置一台同步高速摄像机,在摄像机旁边放置2台激光灯(见图2).高速相机的图片采集频率设置为10 000 Hz,可准确拍摄各种低频涡带的时空演化过程特征图像.



图2 高速摄影试验台

Fig.2 Stand of high-speed photographic experiment

试验用混流泵模型的设计流量 $Q_d = 126.616 \text{ L/s}$,扬程 $H = 2.99 \text{ m}$,转速 $n = 1450 \text{ r/min}$,比转数 $n_s = 829$.泵进口段直径 $D_1 = 200 \text{ mm}$,出口段直径 $D_4 =$

250 mm.叶轮叶片数 $Z=3$, 导叶片数 $Z_d=5$, 叶顶间隙 $tip=0.25$ mm. 工作介质为常温清水.

1.2 外特性试验

图3为重复性试验得到的混流泵外特性曲线,可以看出:6次试验所得的扬程和效率曲线趋势完

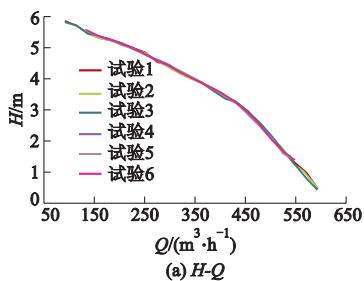
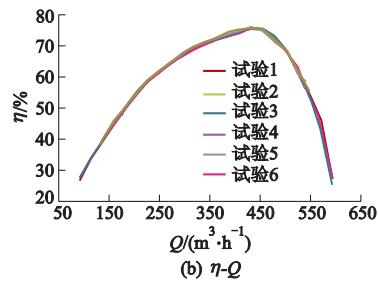


图3 模型泵外特性的重复性试验结果
Fig.3 Repeatability of experimental results of pump performance

全一致,而且数值极为接近,证明了本次试验可重复性好,试验结果可靠性高;该模型泵最高效率点所对应的流量为 $433 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右(相当于原设计的 $0.95Q_d$, 即 120.286 L/s),与之相应的扬程为 3.22 m , 效率为 75.948% .



1.3 高速摄影试验

1.3.1 试验过程

在试验开始前,将全封闭试验台的通气阀门关闭,使管路充满水,保证测试仪器的准确性.在4种流量($0.80Q_d$, $0.90Q_d$, $1.00Q_d$ 和 $1.05Q_d$)工况下进行试验,每种流量工况分别选取3种不同的启动时间(10, 15和20 s).试验时,压力以每次降低 10 kPa 为基准.电动机的转速变化通过变频器控制,转速随时间的变化近似为线性关系.

开始试验,首先将进出口调节阀全开,通过变频器调节模型泵的转速至 1450 r/min ,通过调节出口调节阀将流量调至额定流量工况.然后关闭模型泵,关闭试验系统中与大气相通的阀门,同时打开与真空泵相连接的抽气阀门,进行抽真空,降低模型泵的进口压力至指定压力,并关闭抽气阀门和真空泵,通过对变频器编程以调整模型泵的启动时间,打开高速数码摄像机记录软件,开始进行高速摄影拍摄记录.拍摄结束后再次抽真空降低进口压力,以 10 kPa 为一组,重复上述过程,直至模型泵发生严重空化时结束本次试验.

1.3.2 试验结果与分析

选取4种不同流量工况下,启动时间 $T_a=10 \text{ s}$, 进口压力为 70 kPa , 模型泵内空化发展 $2, 6, 10 \text{ s}$ 和 14 s 时的照片,如图4所示.由图4可以看出:在启动过程中,初始阶段由于叶轮转速较低,泵内部压力没有达到水的气化压力,此时没有出现空化现象;当叶轮达到额定转速后,首先在叶轮叶顶处出现空泡,即叶顶泄漏涡;随后空泡向叶轮流道内发展,出现叶道涡,发生严重的空化.

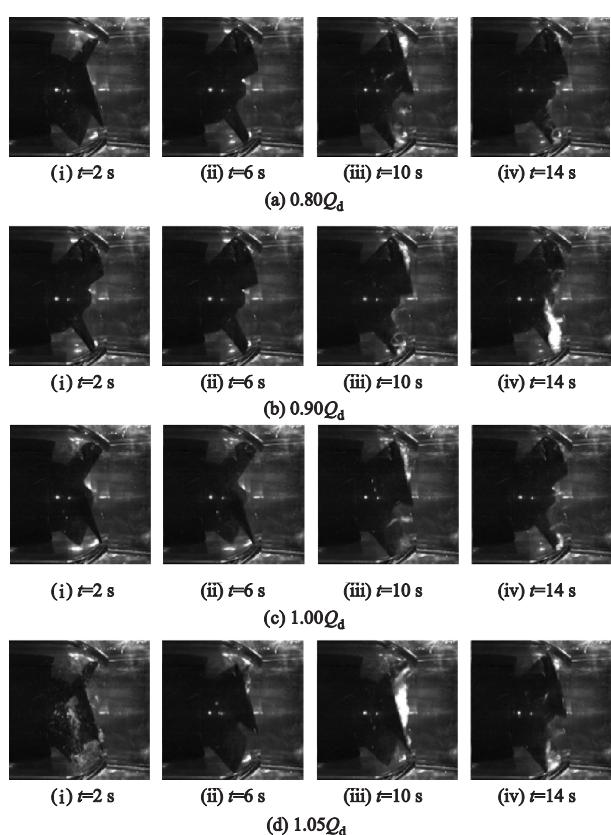


图4 不同流量工况下启动过程空化图($T_a=10 \text{ s}$)
Fig.4 Cavity pictures during startup at different flow rates ($T_a=10 \text{ s}$)

同时也分别对启动时间 $15, 20 \text{ s}$ 时,不同流量工况下的空化现象进行拍摄,显示与启动时间为 10 s 时的现象基本相同.

综上所述,在混流泵启动过程中,首先在叶轮叶顶处出现叶顶泄漏涡,这是由于初始阶段叶轮工作面与背面的压力差引起的.随着时间的推移,流场

内的低压区从叶顶处向流道内延伸,在叶轮流道内产生叶道涡,发生较严重的空化。在进口压力和流量相同时,不同的启动时间下,模型泵在启动过程中,泵内的空化程度随着时间逐渐发展加剧,达到稳态时,空化程度最为严重。

当模型泵的启动时间为 10 s,进口压力分别为 80,60 和 40 kPa 时,截取第 11 s 时不同流量工况下的空化照片,如图 5 所示。

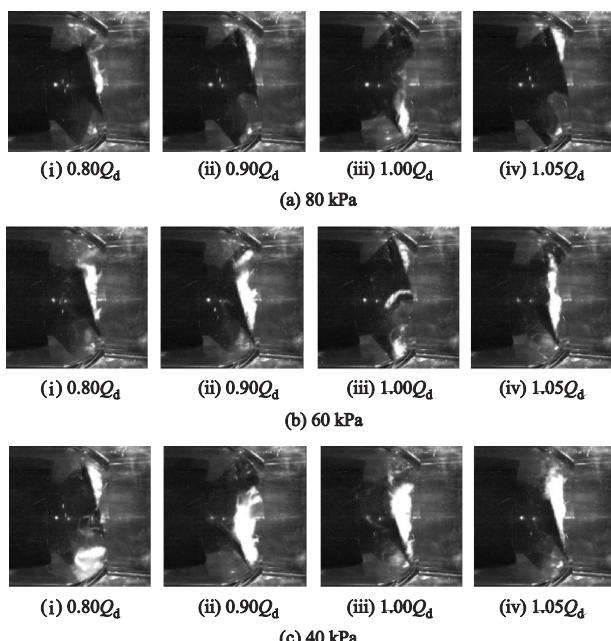


图 5 不同进口压力下的空化图 ($T_a = 10$ s)
Fig.5 Cavity pictures during startup at different inlet pressures ($T_a = 10$ s)

由图 5 可以看出:在相同流量工况下,进口压力越小(即空化数越小),空化发生得越严重;当进口压力为 80 kPa 时,空泡在叶轮叶顶附近聚集,首先产生叶顶泄漏涡,流道内基本没有空泡产生;随着进口压力的降低,空泡逐渐向流道内延伸发展,体积迅速增大;当进口压力降至 40 kPa 时,空泡几乎充满了叶轮流道,产生叶道涡,发生非常严重的空化。

同时对启动时间为 15 和 20 s 时,不同进口压力、不同流量工况时的空化现象进行拍摄分析,发现其空化规律与启动时间为 10 s 时基本相同。

2 结 论

针对混流泵在启动过程中的空化特性进行了高速摄影试验研究,拍摄得到了 4 种流量工况 ($0.80Q_d, 0.90Q_d, 1.00Q_d, 1.05Q_d$) 和 3 种启动时间

($10, 15, 20$ s) 下混流泵模型内部流场的空化过程。通过对试验结果进行分析,得到结论如下:

1) 在混流泵启动过程空化试验中,初始阶段由于叶轮转速较低,泵内压力没有达到水的气化压力,因此没有出现空化现象。在叶轮达到一定转速后,首先在叶轮叶顶间隙处出现了空泡,即叶顶泄漏涡,这是由叶轮在达到额定转速时吸力面跟压力面的压差引起的。随后空泡逐渐向叶片吸力面及流道中发展,产生叶道涡,发生较严重的空化。

2) 在相同的流量工况下,混流泵的进口压力越低(即空化数越小),启动过程中的空化现象就越严重。在泵的进口压力为 80 kPa 时,空泡在叶轮叶顶附近聚集,流道内基本没有空泡产生,随着进口压力的降低,空泡逐渐向流道内延伸发展,体积迅速增大。当进口压力降为 40 kPa 时,空泡几乎充满了叶轮流道,发生非常严重的空化。

3) 在混流泵的进口压力和流量相同时,不同的启动时间下,模型泵在启动过程中,泵内部的空化程度随着时间逐渐发展加剧,达到稳态时,空化程度最为严重。同时发现由于混流泵模型压力面与吸力面之前压差的存在,叶顶间隙处的空化均先于流道内的空化发生。

参考文献 (References)

- [1] 练永庆,田兵,王树宗,等.空气涡轮泵发射系统发射过程仿真分析[J].兵工学报,2011,32(2):155-162.
LIAN Yongqing, TIAN Bing, WANG Shuzong, et al. Simulation and analysis of launching process of air turbo-pump launching system [J]. Journal of military engineering, 2011, 32 (2): 155-162. (in Chinese)
- [2] 王乐勤,吴大转,郑水英,等.混流泵开机瞬态水力特性的试验与数值计算[J].浙江大学学报(工学版),2004,38(6):751-755.
WANG Leqin, WU Dazhan, ZHENG Shuiying, et al. Test and numerical calculation of transient hydraulic characteristics of mixed-flow pump starting [J]. Journal of Zhejiang University (engineering edition), 2004, 38 (6): 751-755. (in Chinese)
- [3] 何志霞,张鑫,陈驭航,等.单孔孔板水力空化特性的可视化与数值模拟[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(4):416-422.
HE Zhixia, ZHANG Xin, CHEN Yuhang, et al. Visualization and numerical simulation of hydraulic cavitation characteristics of single orifice plates [J]. Journal of Jiangsu University (natural science edition), 2017, 38 (4):416-422. (in Chinese)

- [4] 孙帅辉,刘蓉,郭鹏程,等. 转速对涡旋液泵空化性能的影响[J]. 流体机械, 2018, 46 (4):25–31,36.
SUN Shuaihui, LIU Rong, GUO Pengcheng, et al. The effect of rotational speed on the cavitation performance of scroll pump [J]. Fluid machinery , 2018, 46 (4) : 25–31,36. (in Chinese)
- [5] 李伟,季磊磊,施卫东,等. 基于准稳态假设的混流泵启动特性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 34(7):86–92.
LI Wei, JI Leilei, SHI Weidong, et al. Starting characteristic analysis of mixed-flow pump based on quasi-steady state assumption [J].Transactions of the CSAE, 2016, 34 (7) : 86–92. (in Chinese)
- [6] 李伟. 斜流泵启动过程瞬态非定常内流特性及试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2012.

- [7] 席光,卢金铃,祁大同. 混流泵叶轮内部流动的PIV试验[J]. 农业机械学报,2006,37(10):53–57.
XI Guang, LU Jinling, Qi Datong. PIV test of internal flow in impeller of mixed-flow pump [J].Transactions of the CSAM , 2006,37 (10) :53–57. (in Chinese)
- [8] FERNANDEZ J, BLANCO E, SANTOLARIA C, et al. A numerical analysis of a mixed flow pump [C]//Proceedings of the ASME 2002 Joint US–European Fluids Engineering Division Conference,2002:791–798.
- [9] NAGAHARA Takahide, SATO Tadashi, OKAMURA Tomoyoshi, et al. Effect of the submerged vortex cavitation in pump suction intake on mixed flow pump impeller [J]. 夕-械,2002:70–75.

(责任编辑 陈建华)

（上接第 751 页）

- ZHANG Wenqian, ZHU Hua, MA Chenbo, et al. CFD analysis on hydrodynamic bearing capacity of surface groove texture [J]. Lubrication engineering, 2011, 36 (9) : 59–62. (in Chinese)
- [6] WILLIS E. Surface finish in relation to cylinder liners [J]. Wear, 1986, 109(1):351–366.
- [7] 彭旭东,杜东波,盛颂恩,等. 端面微形体对液体润滑机械密封性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2007, 27 (4):352–356.
PENG Xudong, DU Dongbo, SHENG Songen, et al. Effect of face asperity geometry on performance of a liquid lubricated face seal [J]. Tribology , 2007, 27 (4) : 352–356. (in Chinese)
- [8] 纪敬虎,符永宏,魏龙,等. 激光表面织构机械密封

润滑特性的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(5):427–431.

- JI Jinghu, FU Yonghong, WEI Long, et al. Experiment research on lubrication properties of laser surface texturing mechanical seal[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2011, 29 (5) : 427–431. (in Chinese)
- [9] 张晓浩. 动密封部件表面织构及其特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [10] 李琦. 抽油泵间隙流与阀隙流流动特性仿真研究 [D]. 大庆:东北石油大学, 2016.

(责任编辑 陈建华)