

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.05.014

深水自吸式潜水曝气机的设计与试验

陈 斌^{1,2}, 张克危³, 施卫东¹, 吴 钢², 黄学军²

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 南京市水泵工程技术研究中心, 江苏 南京 211500; 3. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了改进自吸式潜水曝气机的深水曝气性能, 提高其浸深充氧能力和动力效率, 研究了曝气机性能并设计了新的样机。基于潜水曝气机的结构特点及射流原理, 在面积比为 2.25、4.00、5.06 和 6.25 时, 分别改变喷嘴形状、喉嘴距、喉管长度、工作压力和流量, 进行了大量的试验, 得出了不同面积比下的流量比与压力比曲线。在此基础上, 拟合了最佳性能曲线, 归纳了设计方法。根据要求的流量比和最佳性能曲线, 可以查出对应的压力比和面积比, 确定出合理的潜水泵工况和曝气机的几何尺寸, 据此设计了新的样机, 并对其进行了试验。结果表明: 该样机将自吸潜水曝气机的最大潜水深度提高到 10 m, 在此水压头下, 水气混合均匀, 射流有力, 7.5 kW 的功率, 进气量达到 122 m³/h, 产生的气泡细密、均匀, 在水下滞留的时间长。

关键词: 潜水射流曝气机; 潜水深度; 面积比; 试验

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)05-0437-04

Design and experiment of deep self-suction submersible aerator

Chen Bin^{1,2}, Zhang Kewei³, Shi Weidong¹, Wu Gang², Huang Xuejun²

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Pump Engineering and Technology Research Center of Nanjing, Nanjing, Jiangsu 211500, China; 3. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: In order to improve the deep aeration performance of a self-priming submersible aerator and improve its oxygenation capacity and power efficiency in deep diving, a new prototype was designed and its performance was researched. Based on the structural character and jet principle of submersible aerator, a series of tests with various nozzle shapes, throat-pipe length, working pressure and flow rates were conducted under different area ratio value of 2.25, 4.00, 5.06 and 6.25, respectively. The curve of flow ratio and pressure ratio were obtained and the best performance curve was fitted, by which the basis for the optimal design was identified. Based on flow ratio and the best performance curve, the corresponding pressure ratio and area ratio can be accordingly figured out to determine reasonable working conditions of submersible pump and geometry of aerator. A prototype was designed and tested, and the results showed that the maximum diving depths increased to 10 meters. Under the water pressure of 10 meters, the gas-liquid mixing was uniform, the jet was powerful with $P = 7.5 \text{ kW}$, and inlet air flow rates reaches 122 m³/h. Fine and even bubbles were developed and had longer residence time. The efficiency of the dissolved oxygen and sewage water treatment was improved, while the tank of aerobic treatment may be appropriate deepen.

Key words: submersible jet aerator; submerged depth; area ratio; experiment

收稿日期: 2010-12-23

基金项目: 江苏省企业院士工作站项目(BM2009525)

作者简介: 陈 斌(1971—) 男, 江苏靖江人, 高级工程师(chenbin21cn@21cn.com), 主要从事流体机械研究。

张克危(1942—) 男, 湖北武汉人, 教授(keweizha@public.wh.hb.cn), 主要从事流体理论与技术研究。

曝气设备是给水生物预处理、污水生物处理的关键性设备,其功能是将空气中的氧转移到曝气池液体中,以供给好氧微生物所需要的氧量,达到生物处理的目的。在污水处理中,特别是脱氮除磷工艺中,高效可靠的曝气设备发挥着重要的作用^[1-2]。

近 10 年来,国外曝气设备得到了飞速发展,针对不同方式的曝气,研究人员对曝气效果做了深入研究^[3-4]。曝气机械种类繁多,结构各异,尤其是潜水曝气机,以其使用维护简单、高效、低成本的特点,得到了许多国外著名环保机械生产厂商和研究机构的注意,对此投入了较大的开发研究力量;研究分为试验研究^[5]与计算流体动力学分析^[6]两个方向,其产品也大量进入正在发展中的中国市场,但对于具体的潜水曝气机设计方法,国外文献较少论述到。

目前,国家对污水排放的要求越来越高,国内未来曝气设备的发展,将高度重视潜水曝气机在结构形式、技术指标等方面的研究^[7-8]。随着潜水深度增加,压力将随之增大,气泡将越细密,在水下滞留的时间将越长,溶解氧也更充分,且同样的污水处理量,曝气池越深,曝气池所占用的土地面积越小,一般池深可加大到 7~8 m,最大可达 10 m。因此,曝气深度成为关注的热点^[9]。

文中围绕着深度潜水曝气的要求展开试验研究,找出自吸式潜水曝气机最佳性能曲线,并由样机验证可行性。

1 曝气机工作原理

潜水射流曝气机属于水下曝气设备,如图 1 所示,由潜水泵和射流泵两大部分组成,射流泵部件又由喷嘴、消声器、进气管、混气室、扩散管等零件组成。它在水体底层或中层充入空气,与水体充分均匀混合,完成氧的气相到液相的转移。

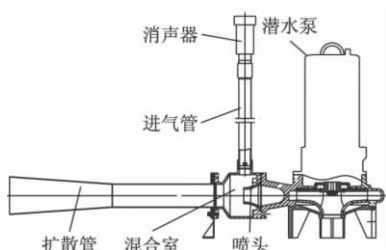


图 1 潜水射流曝气机结构

Fig. 1 Structure of submersible jet aerator

潜水曝气机采用了射流泵的原理,射流泵的结构虽然简单,但其中的流动却非常复杂。特别是液气射

流泵,其中的两相流动是一个非常复杂的过程,从喷嘴出口到喉管出口,其流动形态发生了很大的变化。起初气液两相都是连续相,然后液体射流破碎,气体保持为连续相而液体成为分散相,然后液滴不断融合,液体又变成了连续相,气体成了分散相(液体中的气泡)。这样的流动过程,至今未能进行理论计算,当前商用 CFD 软件对射流曝气机的计算,很难达到理想的精度^[10],所以,本研究以试验研究为主。

2 曝气机的试验研究

为了获得性能优良的深水射流曝气机设计依据,需要寻求液气射流泵的最佳几何参数。因此,制作了试验装置,如图 2 所示。针对最佳参数的选择进行了大量的试验。试验涉及到 5 个参数改变:喷嘴形状;喉嘴距 K ;喉管长度 L ;工作扬程 H_1 ;面积比 h 。

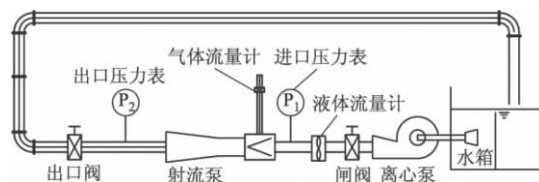


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device

在试验中,通过有机玻璃的透明窗口,发现混气室在气液混合中不起任何作用,气液混合是在喉管前后完成的(见图 3),并且清楚地观察到,随着参数的变化,液体出现了回流现象,这对气液混合和曝气过程的认识提供了可靠的依据。

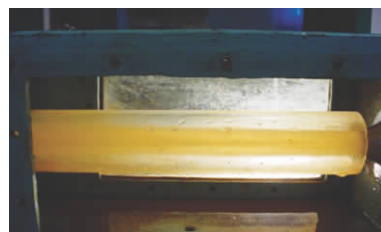


图 3 试验现场

Fig. 3 Picture of experiment

试验表明,在实际产品的设计中,可以尽量减小混气室的体积,使产品更加紧凑,降低成本。

3 样机设计与试验验证

3.1 主要设计参数

在污水处理工艺中使用的自吸式潜水曝气机,

主要的已知参数是所需要的空气流量 Q_2 和淹没深度 H_w 。而设备设计人员在这两个参数已知的前提条件下,必须确定一系列的未知参数,其中包括:潜水泵的额定流量 Q_1 、额定扬程 H_c ;射流泵的流量比 q 、压力比 h 、面积比 m 及几何尺寸,如图4。

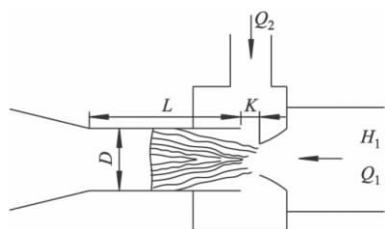


图4 主要参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of major parameters

在描述射流泵的性能、性能曲线、射流泵基本方程以及射流泵的相似律时,均采用无量纲化参数比较方便。对于潜水曝气机而言,射流泵的扬程等于潜水深度 $H_2 = H_w$ 。其中:

流量比

$$q = \frac{\text{空气流量}}{\text{潜水泵流量}} = \frac{Q_2}{Q_1},$$

压力比

$$h = \frac{\text{射流泵的扬程}}{\text{工作扬程}} = \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_w}{H_c + H_w},$$

面积比

$$m = \frac{\text{喉管断面面积}}{\text{喷嘴出口断面面积}} = \frac{A_b}{A_0}.$$

射流基本方程 $h = f(mq)$ 以无量纲化参数压力比 h 、流量比 q 和面积比 m 来表征射流能量的变化,以及零部件的几何尺寸对性能的影响。射流的运动非常复杂,属于有界伴随射流^[11]。射流基本方程可表示为以 m 为参变量的性能曲线。课题组希望能够通过试验方法,用曲线来表述射流的规律变化。

通过大量试验,逐步改变各项几何尺寸,总结试验得出的结果,得出了面积比 m 分别为 2.25、4.00、5.06、6.25 下的流量比 q 与压力比 h 的曲线,并在此基础上拟合了射流曝气机的最佳性能曲线(见图5);在流量比 q 确定后,可以查最佳性能曲线得出合适的压力比 h ,选定潜水泵的参数,再查上述曲线得出合适的面积比 m ,即可确定射流部件的几何尺寸。

试验研究得出的曲线与以前发表的气-气射流曲线^[11]有着明显的不同。通过最佳性能曲线的指导,可以设计出满足在 10 m 水深下进行自吸曝气的射流曝气机。

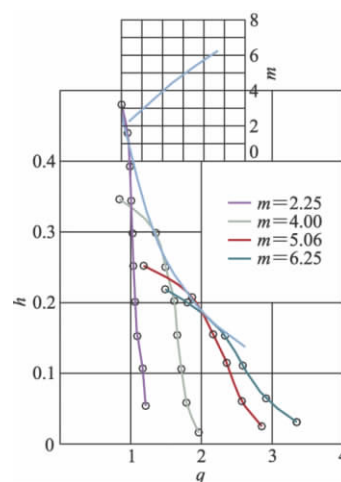


图5 最佳性能曲线

Fig. 5 Optimum performance curves

3.2 射流泵设计

根据以上的试验研究,设计了样机。设计参数:空气流量 $Q_2 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$;淹没深度 $H_w = 10 \text{ m}$;潜水泵配套功率 $P = 7.5 \text{ kW}$ 。

根据最佳性能曲线,流量比选择小一些,压力比较大,对潜水深度的提高比较有利,故初选 $q = 1$ 。所以潜水泵流量 $Q_1 = Q_2 = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由最佳性能曲线查得,此时压力比 $h = 0.4$,面积比 $m = 2.25$ 。

这里讨论的潜水射流曝气机 H_2 等于潜水深度 H_w 。则 $H_1 = \frac{H_2}{h} = 25 \text{ m}$ 。

由此可以确定出潜水泵的额定扬程 $H_c = 15 \text{ m}$ 。喷嘴口径为

$$d = \sqrt{\frac{4Q_1}{\mu\pi\sqrt{2gH_1}}} = 0.0406 \text{ m},$$

取 $d = 41 \text{ mm}$ 。喉管直径 $D = 61.5 \text{ mm}$ 。

喉管长度取为 $14D$,亦即 $L = 860 \text{ mm}$ 。扩散管按照面积扩大一倍,扩散角以不超过 8° 设计。

4 样机试验

根据前述研究成果试制了样机,并在大型循环加压水槽上进行了样机试验,通过水槽系统加压模拟从 1 m 到 10 m 的多个水深状况。通过高速摄像,观察到在 10 m 深的水下射流式潜水曝气机的工作状态以及气泡产生、漂移、溶解的全过程。通过流量计测出了不同水深下的进气量,测量了相应水深下的潜水泵的电流 I 及工作压力 p ,见表1所示。

该试验有力地证明了潜水曝气机是可以适应深水要求的,高速摄像机和照相机清楚显示了 10 m 水

压下的水气混合均匀,射流有力(见图 6),产生的气泡细密、均匀,在水下滞留的时间长,大大提高了氧气的溶解效率,气泡扩散漂移的状态见图 7。

表 1 各水深真机试验数据记录
Tab. 1 Prototype test record of each depth

H_w/m	I/A	p/MPa	$Q_2/(m^3 \cdot h^{-1})$
1	12.8	0.204	171
2	12.9	0.219	150
3	12.8	0.212	141
4	12.9	0.216	132
5	12.9	0.249	128
6	13.0	0.246	127
7	13.0	0.258	124
8	13.1	0.266	123
9	13.3	0.272	123
10	13.4	0.284	122



图 6 10 m 水深下喷口水气射流的状态
Fig. 6 Hydrosphere jet status of nozzle under 10 m water depth



图 7 10 m 水深下气泡扩散漂移的状态
Fig. 7 Bubble's drift-diffusion status under 10 m water depth

5 结 论

1) 得出了潜水射流曝气机的最佳性能曲线。该曲线与以前发表的气-气射流曲线,有明显的不同。

2) 试验中发现混气室在曝气的过程中不起作用,所以在潜水自吸式曝气机设计时,可以尽可能减小混气室的尺寸,使机组更紧凑。

3) 总结了潜水自吸式曝气机的设计方法,并通过样机设计、制造和试验证实了该方法的准确性,取得了满意的结果。

4) 试验结果表明,在 10 m 的水压下,水气混合均匀,射流有力,产生的气泡细密、均匀,且在水下滞留的时间长,大大提高了氧气的溶解效率。

5) 试验的成功,证明曝气池可以适当加深,节约污水处理厂所需的占地面积,对污水处理的工艺改进,必将起到一个良好的促进作用。

6) 在以后的研究中,还需对气泡密度、直径分布等细节做进一步探讨。

参考文献 (References)

- [1] 高俊发,王社平. 污水处理场工艺设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 230-233.
- [2] 葛玉连,赵保康,喻一萍. 浅谈城市污水处理及工业污水在线监测[J]. 排灌机械, 2005, 23(6): 34-37.
Ge Yulian Zhao Baokang, Yu Yiping. Monitoring on-line for industrial wastewater in exit of urban pipeline network[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(6): 34-37. (in Chinese)
- [3] Iguchi M, Okita K, Nakatani T, et al. Structure of turbulent round bubbling jet generated by premixed gas and liquid injection[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, 23(2): 249-262.
- [4] Torres J J, Soler A, Saez J, et al. Hydraulic performance of a deep wastewater stabilization pond[J]. *Water Research*, 1997, 31(4): 679-688.
- [5] Deng Xiaogang. Experimental study of self-excited oscillation pulsed jet aerator[C]. // 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2011.
- [6] Morchain J, Maranges C, Fonade C. CFD modelling of a two-phase jet aerator under influence of a crossflow[J]. *Water Research*, 2000, 34(13): 3460-3472.
- [7] 章建波,宋小文,胡树根. 曝气机的创新设计[J]. 机械制造, 2004, 42(3): 46-48.
Zhang Jianbo, Song Xiaowen, Hu Shugen. The innovation design of sewage-handling equipment[J]. *Mechinery*, 2004, 42(3): 46-48. (in Chinese)
- [8] 陈同德. QSB 型深水曝气机结构设计[J]. 机械工程与自动化, 2009(2): 96-97.
Chen Tongde. Structure design of QSB deepwater aerator[J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2009(2): 96-97. (in Chinese)
- [9] Ratkovich N, Chan C C V, Berube P R, et al. Analysis of shear stress and energy consumption in a tubular airlift membrane system[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(1): 189-198.
- [10] 徐振宇. 曝气机的结构优化及工作状态模拟[D]. 杭州: 浙江大学机械与能源工程学院, 2005.
- [11] 贾宗谟,穆界天,范宗霖. 旋涡泵、液环泵、射流泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

(责任编辑 张文涛)