

射流曝气技术的实验研究

郑晓萌 赵静野 高军

(北京建筑工程学院 北京 100044)

摘 要: 本文对液-气射流泵的主要结构参数和特性进行了理论分析和实验研究。讨论了喷嘴距、混合管长度及背压对引气量的影响。通过对射流曝气充氧性能的量测, 得到了一些有实用价值的结果。

关键词: 液-气射流泵 面积比 喷嘴距 混合管长度 背压 充氧曝气

Experimental Study on water-air aeration

Zheng Xiaomeng Zhao Jingye Gao Jun

(Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract: The principal structural factors and the characteristics of water-air-ejector were studied in this paper. The influences on aeration of the different nozzle space, the different length of mixing tube and the different backing pressure have been discussed. With the oxygenic aeration experiment, some useful results were obtained.

Key words: water-air-ejector; area ratio; nozzle space; mixing tube; backing pressure; oxygenic aeration

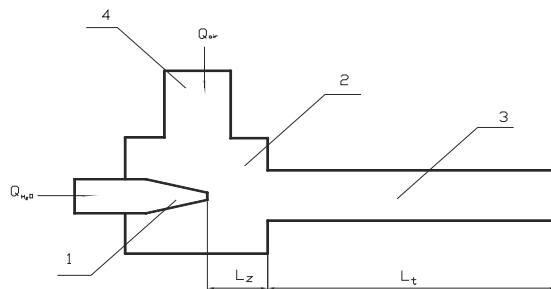
1 引言

液-气射流泵是利用主喷管射流的动能引射环境空气, 并由于射流的紊动扩散作用, 使不同压力的两股流体相互混合, 并引发能量交换的流体机械和混合反应设备。其射流曝气技术广泛应用于水利、给水排水、电力、农牧渔业、化工、石油、轻工等部门。它除了作为流体输送机械使用外, 还可以作为传质和化学混合反应设备。各种有压能源(废水、废气)都可作为它的工作动力, 直接加以利用, 又因其无需可动机械零件辅助, 故可靠性高^[1]。

液-气射流泵的吸气量大小与其工作条件及结构形式(喷嘴形式、喉管与喷嘴出口面积比 m 及混合管长度 L_t 等)有很大的关系。而在一定的工作条件下, 当喷嘴型式及面积比 m 一定时, 液-气射流泵的特性主要取决于喷嘴距和混合管长度。本文从射流的基本理论出发, 着重对液-气射流泵结构参数中的喷嘴距(喷嘴与混合管入口间的距离)、混合管长度以及影响其吸风量的出口背压进行了专门的实验研究^[2]。并在此基础上对射流充氧曝气的性能进行了测定。

液-气射流泵作为一种流体机械是一种集混合、反应、吸收于一体的输送设备, 通过高速喷射流体的动量、能量、质量传递, 对气体进行抽吸和压缩^[3]。此液-气射流泵主要由工作喷嘴、接受室、混合管和吸气室等部件组成。经过喷嘴射出的流体叫工作流体(本实验以水为工作流体), 工作流体以较高的速度从喷嘴出来, 进入接受室, 并将接受室外的空气吸入, 被吸入的流体叫被引射流体。其工作原理如图 1 所示, 由喷嘴 1 射出的水与由吸气室 4 吸入的并进入接受室 2 的空气一起进入混合管 3 中, 水气在混合管 3 中主要经历了液气分相流动、

液体破碎成液滴后分散在气体中的流动和最后形成了液气混合乳液流动。



1—工作喷嘴；2—接受室；3—混合管；4—吸气管

图 1 液-气射流泵工作原理简图

2 基本性能参数

液-气射流泵主要参数定义如下：

Q_{H_2O} —工作流体体积流量。 Q_{air} —被引射流体体积流量。

p_c —混合管出口断面压力。 p_0 —喷嘴进口断面压力。

A_0 —喷嘴出口的横截面积。 A_b —混合管的横截面积。

在性能方程上常用无量纲参数比较方便，主要无量纲数如下：

流量比（气、水流量比），

$$S = \frac{Q_{air}}{Q_{H_2O}}$$

压力比，

$$p = \frac{p_c}{p_0}$$

面积比，

$$m = \frac{A_b}{A_0}$$

3 实验装置及实验方法

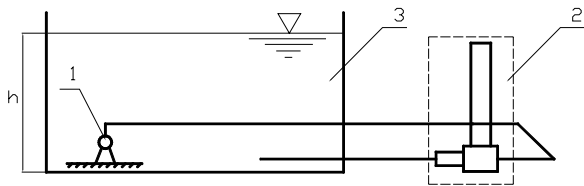
3.1 实验装置

实验是在中国水利水电科学院水工厅高 6m 长 4m 宽 2.5m 的钢板水箱进行；实验样机为北京华阳惠民科技有限公司所生产的 FAK III 型水力引氧机；实验得到了中关村高新技术试验区海淀园的资助；实验是在孙厚钧教授的指导下完成的。

实验仪器：QDF-3 型热球风速计；TES1350A 型噪声计；PF300 port flow TM-300 型多普勒流速仪。

图 2 为实验装置系统示意图。实验系统由液-气射流泵、水箱及潜水泵组成。图中虚线内为液-气射流泵，水平安装在系统中。工作流体水箱（钢板箱）尺寸为长×宽×深：4m×2.5m

$\times 5\text{m}=50\text{m}^3$ ；吸气管用 PVC 板制成 $\phi 300\text{mm}$ 的吸气管，其密封性很好；为了在工作时，能清楚地看清工作流体与被引射流体的混合情况，混合管用有机玻璃制成。



1—潜水泵； 2—液-气射流泵； 3—水箱

图 2 实验装置系统示意图

3.2 实验方法

分别改变喷嘴距、混合管长度及出口背压，来测得液-气射流泵的吸气量 Q_a ，因此先测出吸气的平均风速 U_a 再由公式 $Q_a = U_a A$ 求得吸气量， A 为吸气室的横截面积。考虑到吸气室进口气流不均匀性，测风速时，把吸气室的横截面划分为许多个坐标网格，在测风速时，测每个网格交点处的速度，共 37 个点，然后再用面积加权法，求出截面的平均速度，从而得出风量，此方法测得的结果直观可靠。

4 实验结果及分析

4.1 喷嘴距的影响

喷嘴距即喷嘴至混合管入口的距离，这一段是液-气射流泵的入口段，如图 1 所示其长度为 L_z 。实验时 m 一定， $L_t=2\text{m}$ ， $h=5\text{m}$ ，我们分别取 L_z/D 为 1.5、3.25、5 进行了实验，实验结果见图 3。

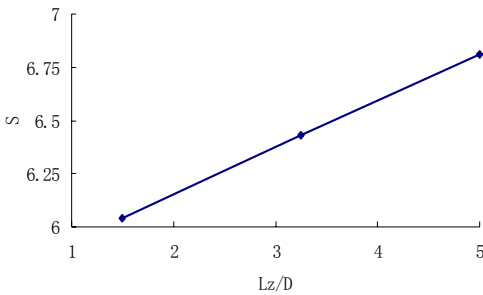


图 3 喷嘴距与流量比的关系图

从 3 图中我们可以看出，喷嘴距的改变对其吸风量的影响是较明显的，流量比随着喷嘴距的增加而增大，这一点与索柯洛夫的论断^[4]有所不同。而根据文献^[5]，当喷嘴距增大时，就会有更多的空气进入接受室与水掺混从而导致液-气射流泵吸气量的增加。

4.2 混合管长度的优化

由图 1 可知 L_t 为混合管的长度，图 4 是当 m 一定， $L_z=500\text{mm}$ ， $h=0.53\text{m}$ 时，取了三个不同混合管长度进行实验时得出的与流量比 S 的关系。由实验结果，我们的分析是：射流在混合管里进行着断面速度场、浓度场和温度场的不断均化过程，伴随着这种均化过程，轴向静压

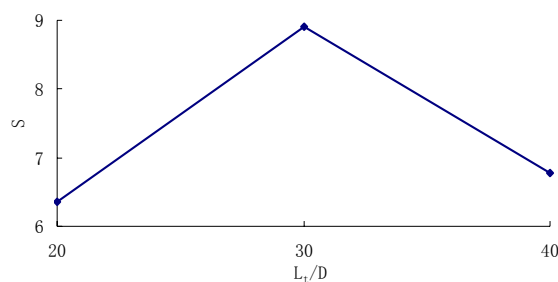


图 4 混合长度与流量比的关系图

力也在一定程度上逐渐恢复。如果混合管有足够长度的话，那么在混合管的某一断面处速度场会趋于稳定，从而静压力也会恢复到最大值。在这一断面之后，速度场不再发生变化，气液混合流会以稳定的紊流状态运动。由于摩擦阻力的存在，静压力会逐渐下降。因此，这一速度场趋于稳定，静压力恢复到最大值的断面，此时与这一断面对应的管长即为混合管最佳长度。混合管长度过长，会增加摩擦损失；混合管过短，则射流的吸气能力得不到充分显示的机会，吸气量尚未达到其可能达到的最大值；适宜的混合长度，才能使液-气射流泵的效率达到最大并能更好的工作。

4.3 工作水箱的水深（出口背压）的影响

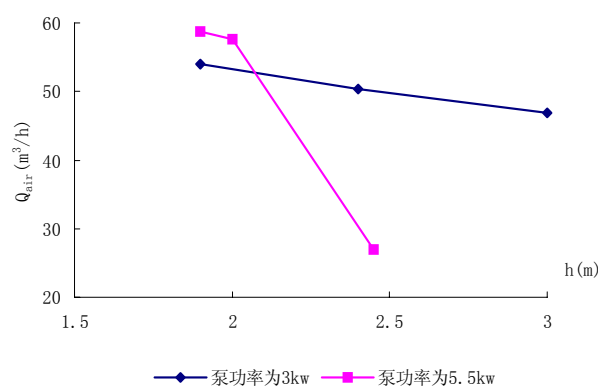


图 5 出口背压与吸气量的关系图

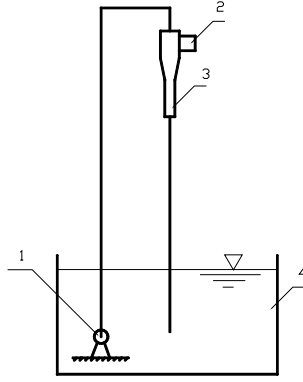
图 5 给出了 m 一定、喷嘴距为 150mm、混合管直径为 80mm 时的不同泵功率情况下的出口背压 h 与吸气量 Q_{air} 的关系图。由图 5 的实验结果可以看出，在上述工况一定的情况下，当混合管出口背压不同时，吸气室的吸气量也是不断改变的，即吸气量是与出口背压成反比的。即随着背压的不断下降，吸气量不断增大。这一点说明了，工作流体的背压在不断的减小，从而使工作流体不用克服更多的背压，来更高效的工作。

5 充氧曝气性能的测定

5.1 实验装置

在对液-气射流泵充氧曝气性能测定时，是把射流泵水平安装方式改成垂直安装方式进行的，其他参数不变，如图 6 所示。

实验仪器：YSI 58 型溶氧测试仪、空盒气压表、压力表、温度计、秒表及 PF300 port flow TM-300 型多普勒流速仪。



1—潜水泵；2—吸气管；3—射流泵；4—工作水箱

5.2 氧总转移系数 K_{La} 及氧动力效率 E_p

曝气充氧过程属于传质过程。氧为难溶于水的气体，在氧由气相向液相转移过程中，阻力主要来自液膜，液膜内氧传递微分方程式为：

$$\frac{dc}{dt} = K_{La}(c_s - c) \quad [6][7] \quad (1)$$

式中 $\frac{dc}{dt}$ ——液体中溶解氧浓度变化速率， $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{min})$ ；

$c_s - c$ ——氧亏值，即氧传质推动力， mg/L ；

c_s ——液膜处饱和溶解氧浓度， mg/L ；

c ——液相主体中在 t 时刻的溶解氧浓度， mg/L ；

K_{La} ——氧总转移系数， min^{-1} 。

将式 (1) 积分整理进行变量置换，以氧亏量 $y = c_s - c$ 作为变量，则 $dy = -dc$

$$\int \frac{-dy}{y} = \int K_{La} \cdot dt \quad (2)$$

对上式在 t_1 到 t_2 时间段内积分（积分过程中把 K_{La} 近似为常数）：

$$\begin{aligned} -\int_{y_1}^{y_2} \ln y &= \int_{t_1}^{t_2} K_{La} dt \\ -(\ln y_2 - \ln y_1) &= K_{La}(t_2 - t_1) \\ \ln \frac{y_1}{y_2} &= K_{La}(t_2 - t_1) \end{aligned} \quad (3)$$

由于氧总转移系数 K_{La} 随温度的增加而增加，氧的饱和浓度与气相中氧的分压力有关，因而要对氧总转移系数和饱和溶解氧值进行校正，以便推算出标准条件下的氧动力效率。

$$K_{La(20^\circ\text{C})} = K_{La(T)} \cdot 1.024^{20-T} \quad (4)$$

式中 $K_{La(20^{\circ}\text{C})}$ 、 $K_{La(T)}$ —— 20°C 和 $T^{\circ}\text{C}$ 时的氧总转移系数， min^{-1} ；

T ——设计或操作温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

氧动力效率：

$$E_p = \frac{K_{La(20^{\circ}\text{C})} \cdot V \cdot C_{S(20^{\circ}\text{C})}}{N_T} \quad (5)$$

式中 E_p ——氧动力效率， $\text{kgO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ；

V ——水箱容积， m^3 ；

$C_{S(20^{\circ}\text{C})}$ —— 20°C 的溶解氧饱和度，为 9.17mg/L 。

有效功率：

$$N_T = \rho g H Q_{H_2O} \quad (6)$$

式中 N_T ——曝气充氧时所耗有效功率， kW ；

ρ ——水的密度， 1000kg/m^3 ；

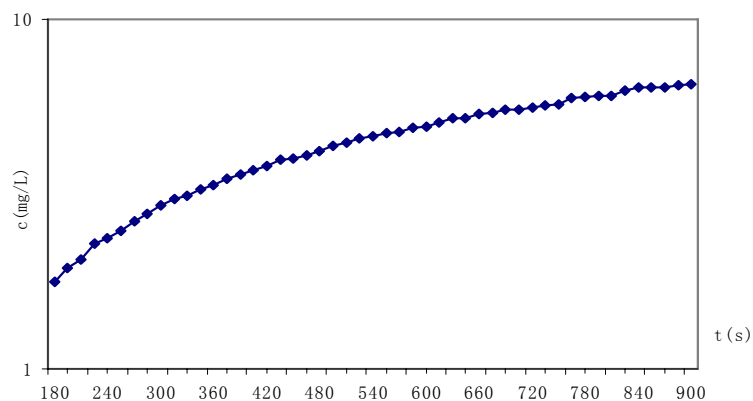
g ——重力加速度， 9.8m/s^2 ；

H ——泵扬程， m ；

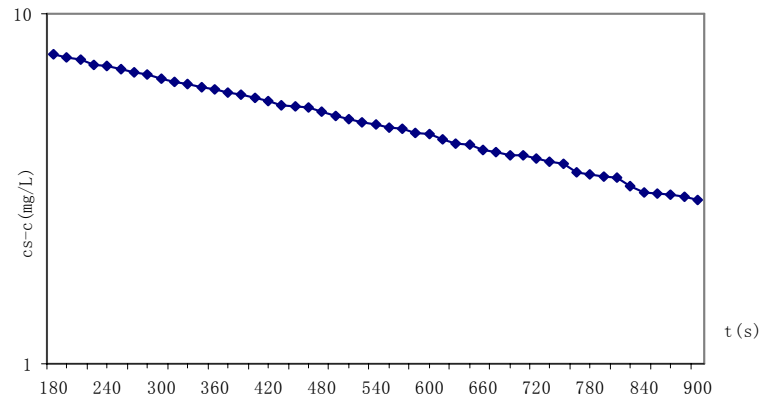
Q_{H_2O} ——水流量， m^3/s 。

5.3 实验方法及结果

本实验是采用间歇非稳态法进行充氧性能测定的，即实验时一池水不进不出，测定池内溶解氧浓度随时间变化的。实验时向池内注满所需水后，将待曝气之水以无水亚硫酸钠为脱氧剂，氯化钴为催化剂，脱氧至零后开始曝气，水中溶解氧浓度逐渐提高。水中溶解氧的浓度 c 是曝气时间 t 的函数，测定水中溶解氧浓度是连续进行的，每隔15秒记录下溶解氧浓度



(a) 充氧历时曲线



(b) 氧亏历时曲线

图 7 溶解氧浓度与时间关系图

值，并利用式 (3) 及 (5) 即可计算出氧总转移系数 K_{La} 和氧动力效率 E_p 。实验结果见图 7 及表 1。

图 7 是 m 一定， $L_z=350\text{mm}$ ， $L_t=4.03\text{m}$ 时，取混合管直径 D 为 65mm 时的充氧能力情况。

表 1. 液-气射流泵氧传质实验结果

D (mm)	V (m^3)	H (m)	t_1 (s)	t_2 (s)	$Q_{H_2O}(\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{s})$	N_T (kW)	K_{La} (min^{-1})	E_p [$\text{kgO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$]
65	50	14.4	180	360	7.63	1.077	0.080	2.04
	50	14.4	420	630	7.63	1.077	0.084	2.23
	50	14.4	690	900	7.63	1.077	0.135	4.86

由图 7 和表 1 可知，最初 K_{La} 及 E_p 都很小，随着时间的增长而增大，这是因为最初由于所加药剂的影响导致氧的溶解能力很差，当以上数值逐渐增大时，此时氧的溶解能力已渐渐摆脱药剂的影响，最终水中的溶解氧浓度达到饱和。由表 1 可知，充氧转移效率达到了 $4.86\text{kgO}_2/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，即每耗一度电，可使水体增加 4.86 公斤溶解氧。

6 结论

- (1) 当面积比 m 一定时，混合管最佳长度可用混合管直径 D 的简单倍数来表示，但混合管最佳长度不是一个固定的常数，与引射介质和被引射介质的密度、容积引射系数、喷嘴有效出水断面面积、混合管直径及引射器混合管内壁的粗糙度等因素有关。这些问题有待进一步研究。
- (2) 在混合管直径 $D=100\text{mm}$ 时，得出了此液-气射流泵混合管的最佳长度为 $30D$ ，流量比达到了 8.9，如图 4 所示，这一实验结果具有较好的实际意义。
- (3) 在固定喷嘴距的条件下，当背压高于临界值时，射流吸气现象不复发生。本试验在各参数都为最佳范围内，混合管直径为 $\Phi 80\text{mm}$ 时，改变泵功率测得了相应的液-气射流泵停止吸气时的临界值，实验结果见表 2。

表 2 不同泵功率下的背压临界值

泵功率(kW)	3	5.5	7.5
临界值(m)	3.1	3.65	4.65

- (4) 即使在同一工作条件下, 氧总转移系数亦非常量, 而是随充氧历程逐渐增大, 其机理有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 赵静野, 孙厚钧, 高军. 引射器基本工作原理及其应用. 北京建筑工程学院学报, 2000, (4)
- [2] 刘景植. 液气射流真空泵最优喉长计算理论研究. 第四届全国喷射技术学术会议. 浙江大学出版社, 1992
- [3] 陆宏圻. 射流泵技术的理论及应用. 水利电力出版社, 1989
- [4] Е. Я. 索科洛夫. 喷射器. 科学出版社, 1977
- [5] 余常昭. 紊动射流. 高等教育出版社, 1993
- [6] 建设部给水排水产品标准化技术委员会. 给水排水产品标准汇编(上). 中国标准出版社, 2000
- [7] 李燕城. 水处理实验技术. 中国建筑工业出版社, 1989