

文章编号 : 1004 - 7271(2006) 01 - 0071 - 07

气力提升泵性能影响因子的初步试验

袁军亭, 汤 威, 孙满昌

(上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

摘 要 : 气力提升泵的水输送量反映了提升管进口的流速情况, 而进口流速是衡量吸鱼效果的重要因素。以水槽试验的方法研究了不同因子对水输送性能的影响, 共测试了使用 6 种平板孔喷嘴、2 种环状孔喷嘴、5 种潜水比、3 种喷嘴水下潜没深度和 3 种管径的水输送量数据, 并进行了活鱼抽吸试验。分析结果表明, D2 和 D3 平板孔喷嘴由于合理的孔分散程度而相对提高了水输送量, 但与其它喷嘴差异不显著。具备理想的气泡尺寸和分散程度的 D6 环状孔喷嘴获得了最佳的水输送性能。增加潜水比和喷嘴水下潜没深度或减小提升管管径对水输送性能的提高有决定性影响。当集鱼装置始终维持高鱼水比例时, 气力提升泵具有较好的活鱼抽吸能力。

关键词 : 水输送量 ; 喷嘴 ; 潜水比 ; 潜没深度 ; 管径 ; 吸鱼

中图分类号 S 972.7 文献标识码 : A

Preliminary experiment on several factors affecting the performance of air lift pump

YUAN Jun-ting, TANG Wei, SUN Man-chang

(Ocean College, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract : The water flow velocity in the suction pipe, which is crucial for evaluating the performance on pumping fish, can be measured by the pumped water flow rate of the riser in an air lift pump system. Several factors affecting the performance of water transportation were investigated through experimental methods in a water tank. Different designs involving six kinds of plane air injectors, two annular air injectors, five submergence ratios, three submergence depths and three sizes of riser were tested and water flow rates were recorded. Experiments on pumping live fish were also carried out. The results indicated that the D2 and D3 plane air injectors increased the pumped water flow rate due to its proper orifice distribution, but the difference between all plane air injectors was not distinct. The D6 annular air injector based on its ideal bubble size and distribution had the optimal capability for pumping water. Increasing the submergence ratio and the submergence depth or decreasing the diameter of the riser was determinant to improve the performance of the pump. Preferable capacity for pumping fish could be achieved while higher proportion of fish to water was kept in the fish-assembling device.

Key words : pumped water flow rate ; air injector ; submergence ratio ; submergence depth ; diameter ; pumping fish

收稿日期 2005-06-06

基金项目 : 上海水产大学校长专项基金项目(科 04 - 96)

作者简介 : 袁军亭(1973 -), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 讲师, 主要从事网箱系统工程方面的研究。E-mail : jyuan@shfu.edu.cn

通讯作者 : 孙满昌(1943 -), 男, 浙江嵊泗人, 上海水产大学首席教授, 博士生导师, 主要从事渔业工程与渔具渔法选择性研究。

E-mail : mcsun@shfu.edu.cn

随着我国海水网箱养殖规模的不断扩大,传统的人工起鱼作业方法已不能满足当今大型抗风浪网箱高效起鱼的需要。国内部分高校和科研单位相继进行了网箱活鱼起捕机的研究^[1-3],但研发的产品过于单一。气力提升式鱼泵在国外大型养殖设施中也得到了广泛的应用^[4],但在近年来国内的鱼泵研究领域仍为一项空白。气力提升是一种利用压缩空气作为工作介质来输送液体或固液混合物的技术。常用的气力提升泵一般由垂直布置于液体中的提升管、进气管、注气混合腔和作为动力源的空气压缩机构成,其结构较简单,且水下无运动构件,因而具备无需润滑剂、损耗小、维护成本低、可靠性高等优点^[5]。以下将通过水槽试验的方法对影响气力提升泵性能的主要因子进行实测和初步分析,并为气力提升技术运用于渔业领域乃至气力提升式鱼泵的设计提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

透明玻璃水槽(565 mm × 590 mm × 1 000 mm)一只,水深为 950 mm。水槽上方设置补水箱,由闸阀控制水流量,以维持水槽水位基本恒定。

提升管由外径 $\Phi 50$ mm(内径 $\Phi 47$ mm)、 $\Phi 40$ mm(内径 $\Phi 38$ mm)、 $\Phi 32$ mm(内径 $\Phi 30$ mm)PVC 管分别制成,长度 L 覆盖 1000 mm、1100 mm、1200 mm、1300 mm、1500 mm 的试验系列,以构成不同的潜水比 ϵ (潜水比为喷嘴水下潜没深度 Z 与提升管最高点至注气喷嘴的距离的比值,即 $\epsilon = Z/(L - 100)$)。进气管由外径 $\Phi 20$ mm(内径 $\Phi 16$ mm)PVC 管制作而成。

一台 V-0.14/10 型二级风冷式空气压缩机提供压缩空气,压缩机电机额定功率 1.5 kW,储气罐容积 0.064 m³,排气压力 1.0 MPa,最大排气量 0.14 m³/min。

Parker^[6]指出,在实际应用中压缩空气的注入方式基本上都是孔喷射,Apazidis^[7]在实验室条件下得出适宜的气泡直径为 1~4 mm,因此本试验选用此范围的一个直径系列。通过 ZYT-13 型台式钻床配合麻花钻头($\Phi 0.9 \sim 3.5$ mm)在圆形 PVC 盘片($\Phi 20$ mm,厚为 1 mm)上钻凿小孔,并将盘片紧固在进气管出口构成平板孔喷嘴,沿提升管圆周钻凿小孔,制作了环状孔喷嘴。共加工了 6 种平板孔喷嘴和 2 种环状孔喷嘴(表 1),并始终保持小孔总面积为 10 mm² 左右,以确保注气面积基本相同。

表 1 喷嘴规格

Tab. 1 Specifications of air injectors

| 类别 | 名称 | 孔径(mm) | 小孔数目 | 总面积(mm ²) | 分布情况 |
|-------|--------|--------|------|-----------------------|--|
| 平板孔喷嘴 | D1 | 3.5 | 1 | 9.62 | 中心孔 |
| | D2 | 2.5 | 2 | 9.82 | 沿 $\Phi 11$ mm 圆周均匀分布 |
| | D3 | 2.0 | 3 | 9.42 | 沿 $\Phi 11$ mm 圆周均匀分布 |
| | D4 | 1.7 | 4 | 9.08 | 沿 $\Phi 11$ mm 圆周均匀分布 |
| | D5 | 1.4 | 6 | 9.24 | 沿 $\Phi 11$ mm 圆周均匀分布 |
| | D6 | 0.9 | 15 | 9.54 | $\Phi 11$ mm 圆周上均匀分布 10 孔, $\Phi 5$ mm 圆周上均匀分布 5 孔 |
| 环状孔喷嘴 | 2D3 环状 | 2.0 | 3 | 9.42 | 沿外径 $\Phi 40$ mm 提升管的圆周均匀分布 |
| | D6 环状 | 0.9 | 15 | 9.54 | 沿外径 $\Phi 40$ mm 提升管的圆周均匀分布 |

1.2 测量仪器

LZB-6 型(量程 40~400 L/h,精度 10 L/h)和 LZB-15 型(量程 400~4 000 L/h,精度 100 L/h)玻璃转子流量计用于测量不同大小的气流量;压力表接于管路中,用于衡量进气压力;水输送量通过量筒(量程 200~2 000 mL,精度 20 mL)测量;试验时间由秒表(精度 0.1 s)测得;用普通水银温度计测量环境温度。

1.3 试验方法与数据测定

将提升管竖直安放在水槽中,并使进气管注气喷嘴位于提升管底部上方 100 mm 处。压缩空气由空

气压缩机排出,通过内径 $\Phi 8 \text{ mm}$ 压缩空气管到达减压阀(保持工作压力为 0.02 MPa),压力被降低后通过流量计到达流量控制阀,最后进入进气管直至喷嘴。各试验装置如图 1 所示。

吸鱼管道吸口的流速是衡量吸鱼效果的一个重要因素^[8]。而对于同一直径的提升管,水输送量的大小一定程度上反映了吸口的流速情况。因此,将测定在不同的喷嘴形式、潜水比、喷嘴水下潜没深度、提升管管径等条件下得到的水输送量数据,通过对试验结果的处理来分析注气孔尺寸和分布、潜水比等因子对提升性能的影响。

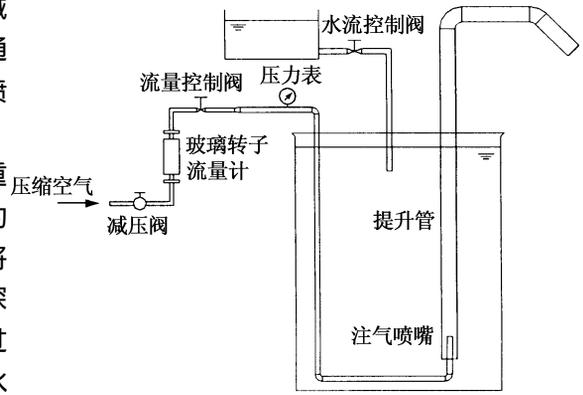


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental devices

2 结果与分析

2.1 平板孔喷嘴的影响

选用外径 $\Phi 40 \text{ mm}$ 提升管。图 2 均做出某一喷嘴的水输送量变化曲线作为参照线以便与其它喷嘴相比较。结果显示,所有喷嘴产生的水输送量均随着气流量的增加而增大,点的变化趋势与参照线也十

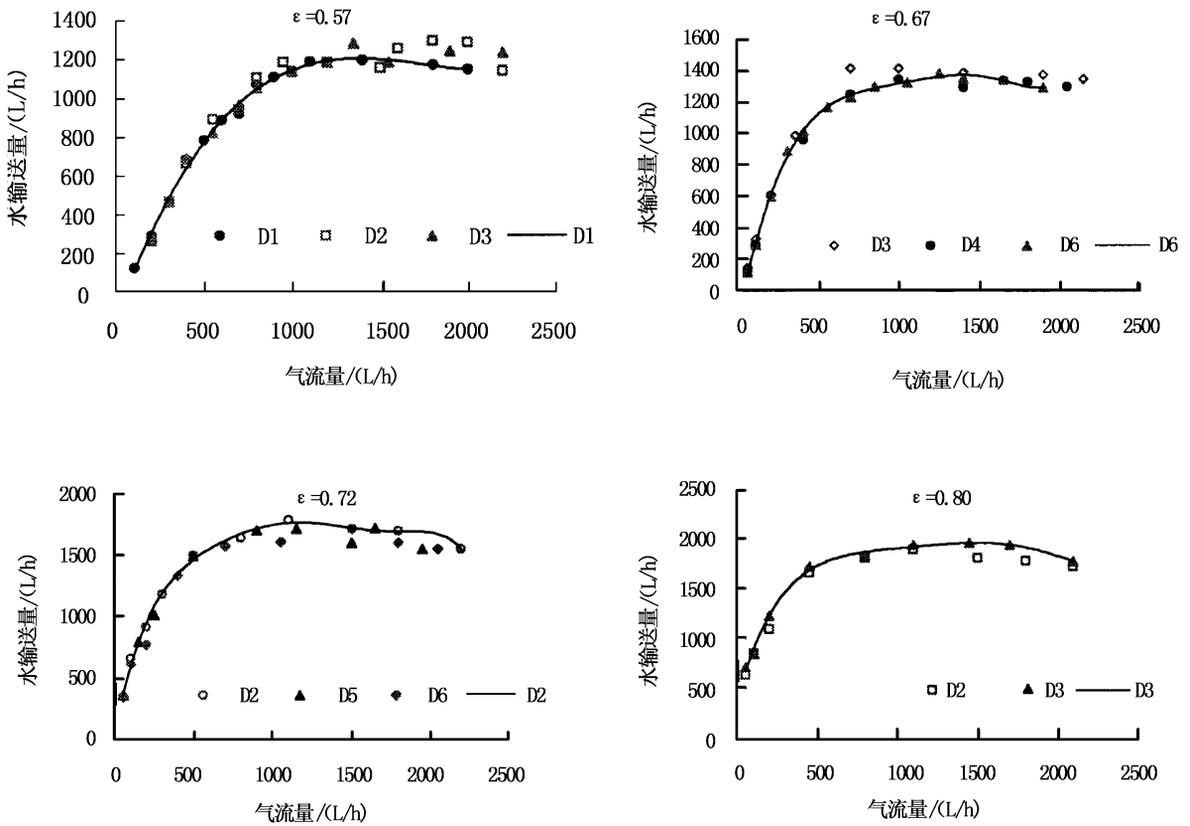


图 2 不同平板孔喷嘴在不同潜水比下的水输送量比较

Fig. 2 Variations of water flow rate for different plane air injectors and submergence ratios

分相似。水输送量在气流量区间(1 000, 2 000) L/h 内达到峰值,且曲线在此区间内基本保持水平。当气流量超过 2 000 L/h 左右时,曲线开始出现不同程度的下降。曲线在 50~1 000 L/h、1 000~2 000 L/h、2 000 L/h 之后的三个阶段分别出现的上升、维持和下降现象可以通过正常段塞流、环状流和雾状流三种两相流流型来解释^[9]。曲线维持在较高值时能达到较大的吸口流速,因此(1 000, 2 000) L/h 为较理想的工作区间。

通过比较各潜水比的试验数据发现,对于不同的喷嘴,不仅某一特定气流量对应的水输送量有差别,而且在相同的潜水比下水输送量峰值也不一样。潜水比为 0.57 时 $D2 > D3 > D1 > D4 > D6 > D5$;潜水比为 0.67 时 $D3 > D2 > D1 > D5 > D6 > D4$;潜水比为 0.72 时 $D2 > D4 > D1 > D3 > D5 > D6$ 。其中 D2 和 D3 的平均值最高, D6 的输送能力相对较差,其平均值相比 D2 低了约 5%。

Guets 等^[10]认为,小气泡产生的滑差损失应比大气泡小,每单位体积的注入气体在水气混合物中也能腾出更多的空间,因此会提高输送能力。然而, D6 虽然孔径比 D2 和 D3 小,但后者却获得了最佳的水输送性能。原因在于,具备 15 个孔的 D6 由于小孔数目众多且间距过小,当注气压力较低时,气泡趋向于合并成个体而占据了提升管中心的大部分区域,一定程度上阻碍了水流的上升^[11]。可见,在平板孔喷嘴试验中,孔的分散程度相比孔径来说对提升性能的影响更显著,孔间距为 11 mm 的 D2 和 9.5 mm 的 D3 的孔的分布更加合理。然而,各喷嘴产生的水输送量差异并不大,因而对吸口流速的影响也不大。

2.2 环状孔喷嘴的影响

平板孔喷嘴采取从提升管底部垂直进气的方式,因而占用了部分吸口面积。若要用于固体的输送,吸口部分必须重新设计。参考平板孔喷嘴的试验结果,分别制作了 3 个孔(孔间距较大,约为 40 mm)和 15 个孔(孔间距为 8 mm,接近 D3 平板孔喷嘴的孔间距)的环状孔喷嘴,称为“D3 环状”和“D6 环状”。环状孔的孔心轴线与提升管轴线的夹角较小,利于气泡的分散(图 3)。

试验结果表明, D3 和 D6 环状孔喷嘴的水输送量和提升效率均优于各自的平板孔喷嘴,当进气量为 1200 L/h 时, D6 环状孔喷嘴的水输送量约为 D6 平板孔的 1.31 倍,然而这不排除平板孔喷嘴占用提升管吸口面积所造成的影响。此外, D3 环状孔的效果又不及 D6 环状孔(图 4)。

可见,环状孔喷嘴比平板孔喷嘴的输送能力更强。D6 环状孔喷嘴的孔间距由于与 D3 平板孔喷嘴的孔间距较接近而更加合理,小气泡沿壁面的发散也更加平稳,而 D3 环状孔的分布过于分散,且较大的气泡会向中心移动从而影响水流的径向分布,可能会造成聚集于轴线部位的大气泡更早的转变成为团状气流,这对水流输送是十分有害的^[10]。由此可得,不同环状孔喷嘴造成的性能差异应是孔的尺寸和分散程度共同影响的结果。

2.3 潜水比的影响

图 5 为气流量一定时 D2 和 D3 随潜水比的增大所产生的水输送量变化。试验通过保持提升管水下深度不变并减小扬水高度来增加潜水比。结果表明,当潜水比增大时,水输送量几乎呈直线上升。当进气量为 1800 L/h 时, D3 在 $\epsilon = 0.89$ 时的水输送量约为 $\epsilon = 0.57$ 时的 1.88 倍,吸口流速得到大幅提高。

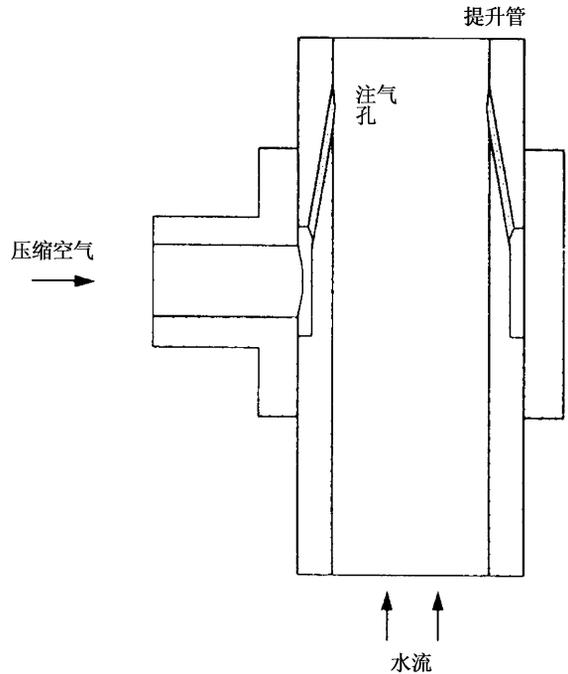


图 3 环状孔喷嘴结构

Fig.3 Structure of annular air injector

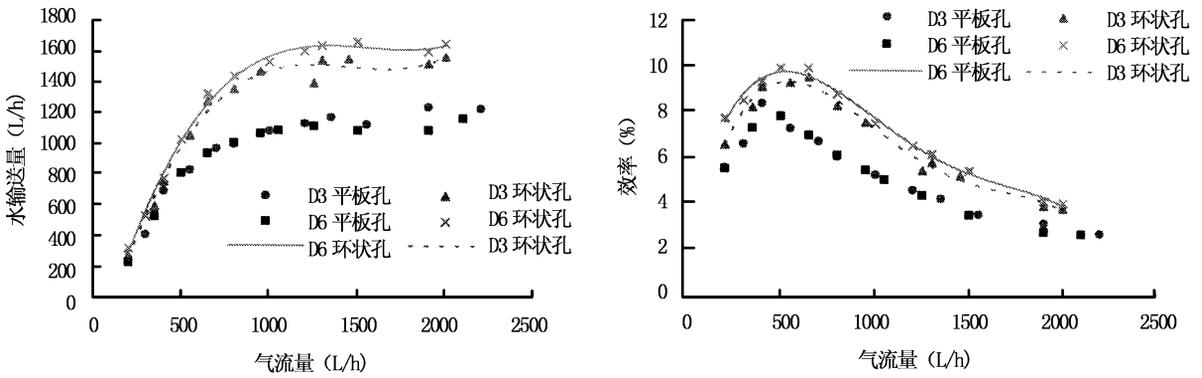


图 4 环状孔喷嘴和平板孔喷嘴的性能比较(ε = 0.57)

Fig.4 Comparison of the performance of plane and annular air injectors(ε = 0.57)

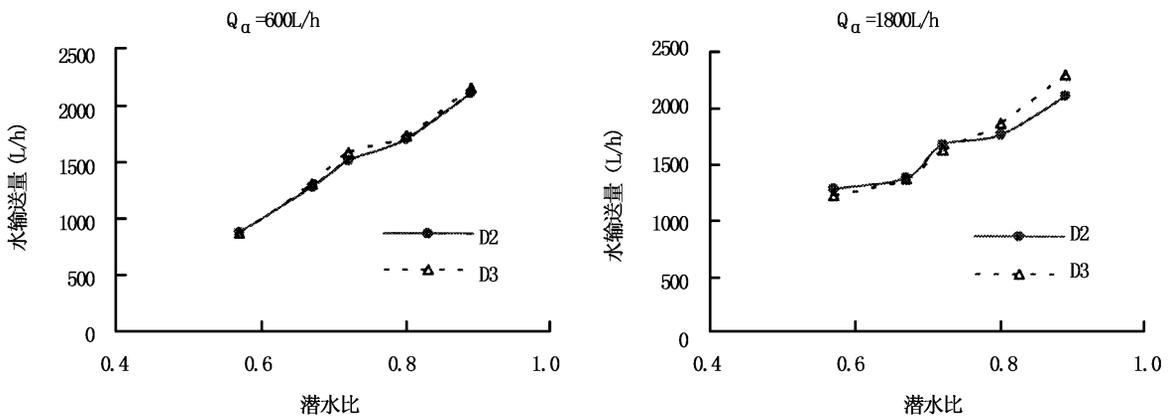


图 5 气流量一定时 D2 和 D3 在不同潜水比下的水输送量

Fig.5 Variations of pumped water versus submergence ratio for D2 and D3 at a given air flow rate

无论使用何种喷嘴,潜水比均是影响提升性能的关键因子,也是衡量输送固体的量的决定性因素^[12]。当潜水比逐渐增大时,水输送量均不断突跃。要获得较大的吸口流速,可以通过适当增加潜水比来实现,要获得同样的水输送量,选用较大的潜水比也可以大大减少压缩空气的用量和系统能耗,达到更高的经济效益。

2.4 潜水比一定时喷嘴水下潜没深度的影响

选定潜水比为 0.67,对总长 L 为 1 300 mm、1 200 mm、1 000 mm 的外径 Φ 40 mm 提升管进行了 D3 平板孔喷嘴水下潜没深度的试验(图 6)。结果显示,总长 1 300 mm 提升管的喷嘴潜没深度为 800 mm,相比 1 000 mm 提升管的 600 mm 仅增加了 200 mm,然而测得的水输送量峰值增大了 310 L/h,提高了约 21.9%。

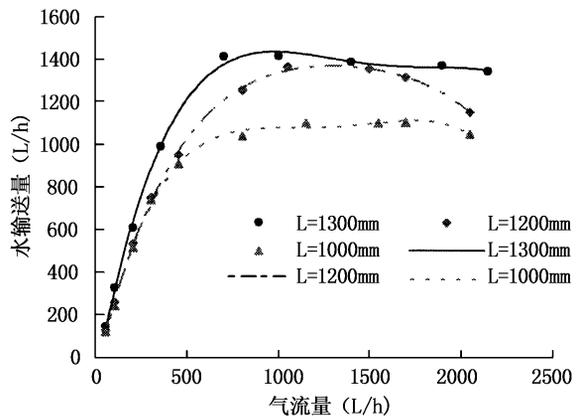


图 6 喷嘴水下潜没深度对提升性能的影响(ε = 0.67)

Fig.6 Effect of different submergence depths on the performance of air lift(ε = 0.67)

喷嘴水下潜没深度的增加使得提升管进口与出口之间的初始压差更大,这对提升性能的提高有着

积极的影响。国外鱼泵产品中,一根直径为 25 cm 的提升管在一台排气量为 5.24 m³/min 的空气压缩机驱动下,可被设置在 12 m 水深处,这时可达到 1.8~2.4 m 的扬水高度^[4]。可见,气力提升式鱼泵长达十余米的水下部分对吸口吸力的影响是十分显著的。

2.5 提升管管径的影响

以 D3 平板孔喷嘴为研究对象,观察提升管管径对性能的影响程度(图 7)。可以得出,无论气流量大小,外径 Φ 40 mm 提升管的水输送量曲线始终位于外径 Φ 50 mm 提升管曲线的上方。而当气流量较小时,外径 Φ 32 mm 提升管的水输送量首先高于另外两者,随后持续平缓,基本保持不变。造成外径 Φ 32 mm 提升管曲线与其它曲线交叉的原因可能是由于进气管占用了提升管大部分的进口面积,因而当气流量增大时大大限制了水流的上升和排出。

以上试验结果与 Ohnuki 和 Adimoto^[13]的研究基本一致。当提升管管径增大时,气液两相流空隙率最大值出现的位置逐渐由管壁附近向中心移动,轴线部位空隙率的增大意味着越来越多的小气泡在管中心聚集成大个体,从而抑制了水的输送。相比较而言,小管径提升泵所能达到的高输送、低滑差和高效率使它们在许多特殊场合得到应用^[14],但在泵的设计中要根据输送固体的实际情况来选择最合适的管径。

2.6 活鱼抽吸试验

为了衡量气力提升泵输送固体的能力,将获得最佳水输送性能的 D6 环状孔喷嘴和外径 Φ 40 mm 提升管相组合,并针对提升管内径选择适当体宽的活鱼进行不同进气量的抽吸试验(注气压力为 0.08 MPa)结果如表 2 所示。

表 2 活鱼抽吸试验数据

Tab.2 Experimental data of the capacity on pumping live fish

| 初始鱼水比例 | 进气量 (L/h) | 抽吸时间 (s) | 起捕体长组(条) | | | 剩余体长组(条) | | |
|--------|-----------|----------|----------|--------|-------|----------|--------|-------|
| | | | 10~12cm | 8~10cm | 3~5cm | 10~12cm | 8~10cm | 3~5cm |
| 1:3 | 1600 | 16.7 | 3 | 9 | 48 | 1 | 2 | 20 |
| | 2000 | 21.9 | 2 | 10 | 46 | 2 | 0 | 13 |
| | 2400 | 28.2 | 3 | 8 | 63 | 1 | 2 | 8 |
| | 2700 | 24.7 | 2 | 9 | 63 | 2 | 0 | 10 |
| | 1600 | 19.8 | 4 | 11 | 78 | 3 | 1 | 22 |
| 1:2 | 2000 | 23.4 | 5 | 12 | 78 | 2 | 4 | 14 |
| | 2400 | 20.6 | 5 | 10 | 72 | 3 | 2 | 15 |

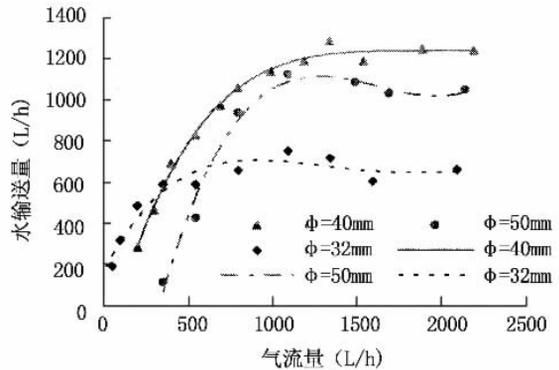


图 7 管径对提升性能的影响($\epsilon = 0.57$)

Fig.7 Effect of risers with different diameters on the performance of air lift($\epsilon = 0.57$)

3 讨论

从试验结果看,泵的喷嘴设计应选择环状孔的形式,确定注气面积后,再根据提升管管径确定孔的间距和直径,以保证能够注入较小直径的气泡并使气泡稳定发散于液体中。这样能显著增加水输送量和提高吸口流速,也有利于抽吸固体的启动性能的提高。此外,考虑到提升管较长的水下部分给生产操作带来的不便,也可对泵的结构作相应改进,如用聚乙烯软管代替原来厚重且不便移动的提升管主管元件,设计可由潜水员操作的潜水吸头作为气力提升泵的核心元件,提升管与进气管通过快速接头与潜水吸头相连,等等。

气力提升泵具有较好的活鱼抽吸能力,且当集鱼装置中的鱼水比例升高时能达到更大的抽吸量。然而,当鱼不断被抽吸出去使集鱼装置中的鱼水比例逐渐降低时,抽吸效果随之变差。因此,维持集鱼装置中的高鱼水比例对活鱼输送效率有很大的影响。

数据处理过程中也发现,在潜水比较低时,只得到相当低的提升效率,且平板孔喷嘴试验中测得的最高效率也仅为 $\epsilon = 0.80$ 时 D3 的 23.10%,这主要是由于计算中未除去管道、弯头、喷嘴等的沿程和局部水头损失而造成的。去除这部分的影响,Khalil 等^[11]在对 $\Phi 33$ mm 提升管的试验中获得了 37.6% 的最大效率($\epsilon = 0.75$ 时)。

当前关于三相流流型的研究甚少,实际应用环境与实验室尺度也存在很大差异,在实验室的低气流、低水流速度条件下推导出的经验和半经验公式并不能精确的判断和预测实际应用中的三相流动情况^[15]。因此,本文仅提供了气力提升泵的试验原则和设计方法,气力提升泵的设计应以实际尺寸元件的相应试验数据为准。

致谢:本研究在柏春祥老师、庄保陆等同学热心的帮助下完成,在此谨示谢忱!

参考文献:

- [1] 郭建平,潘联芳,徐文辉.大型深水网箱间歇式真空吸鱼泵设计探讨[J].渔业现代化,2003(2):9-10.
- [2] 叶燮明,徐君卓,陈海鸣,等.网箱吸鱼泵的研制和试验[J].渔业现代化,2003(3):25-26.
- [3] 黄滨,关长涛,林德芳,等.网箱真空活鱼起捕机的研究[J].海洋水产研究,2004,25(3):54-60.
- [4] Gorrie W. Grading and handling around the hatchery[J]. Hatchery Int, 2001(3):36-37.
- [5] 赫尔姆特·舒尔茨.泵原理计算与结构[M].北京:机械工业出版社,1991.342-346.
- [6] Parker G J. The effect of footpiece design on the performance of a small air lift pump[J]. Int J Heat and Fluid Flow, 1980, 2: 245-252.
- [7] Apazidis N. Influence of bubble expansion and relative velocity on the performance and stability of an air lift pump[J]. Int J Multiphase Flow, 1985, 11: 459-479.
- [8] 黄滨,关长涛,林德芳.网箱真空吸鱼泵试验中的技术问题研究[J].渔业现代化,2004(6):39-41.
- [9] 李炜.大洋采矿气力提升特性的试验研究[J].有色矿山,1997(3):11-18.
- [10] Guets S, Ooms G, Oliemans R V A, et al. Bubble injector effect on the gaslift efficiency[J]. AIChE J, 2003, 49: 2242-2252.
- [11] Khalil M F, Elshorbagy K A, Kassab S Z, et al. Effect of air injection method on the performance of an air lift pump[J]. Int J Heat and Fluid Flow, 1999, 20: 598-604.
- [12] 邹伟生.锰结核开采的气力提升参数研究[J].矿冶工程,1999,19(1):24-27.
- [13] Ohnuki A, Akimoto H. Experimental study on transition of flow pattern and phase distribution in upward air-water two-phase flow along a vertical pipe[J]. Int J Multiphase Flow, 2000, 26: 367-386.
- [14] Reinemann D J, Paralange J Y, Timmons M B. Theory of small diameter air lift pumps[J]. Int J Multiphase Flow, 1990, 16: 113-122.
- [15] Mudde R F. Gravity-driven bubbly flow[J]. Annu Rev Fluid Mech, 2005, 37: 393-423.