

# 喷嘴排列方式对气举提升性能的影响

何湘桂, 唐川林, 张凤华, 胡东, 杜鹏

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 实验研究了喷嘴的不同排列方式和进气量对气举提升管出口端的排水量、排沙量、沙颗粒浓度和提升效率的影响。实验结果表明, 喷嘴的不同排列方式和进气量对气举提升性能有显著影响。在进气量一定的情况下, 选择合理的排列方式可以获得较好的提升效果; 而随着进气量的增加, 反映气举提升性能的各项参数基本呈现出先增大后减小的趋势, 但各量峰值对应的进气量不尽相同。

**关键词:** 气举; 喷嘴; 排列方式; 排沙量; 提升效率

中图分类号: TD432

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)04-0049-05

## Effect of Nozzle Arrangements on the Performance of an Air Lift

He Xianggui, Tang Chuanlin, Zhang Fenghua, Hu Dong, Du Peng

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Air-lift performance was investigated experimentally for different arrangements of nozzles and air flow rates. The discharged liquid flux, discharged particle mass, concentration of particles and lifting efficiency were tested by changing the arrangements of airflow nozzles and air flow rate. The experimental results show that the change of air-injecting method has great effect on the air-lifting performance. It is concluded that optimal lifting performance can be obtained with a suitable air-injecting method under the condition of certain air volume. But along with the increase of air flow rate, air-lift performance parameters presents the first increases and then decreases, the peak of each parameter corresponding to air flow rate is very different.

**Keywords:** air-lift; nozzle; airflow arrangement; discharged particle mass; lifting efficiency

## 1 研究背景

气举(也称气力提升泵, airlift pump)是以压缩空气为工作介质, 来抽吸和压送液体或浆体的流体输送机械。气举本身没有运动部件, 结构非常简单, 是举升矿物、石油及输送危险性化工液体物质的有效而可靠的工具<sup>[1]</sup>。

国内外研究者对气举的提升特性进行了大量研究, 取得了一系列研究成果<sup>[2-9]</sup>, 为气举采油、采矿等提供了理论依据和借鉴。如唐川林等人提出气举

和振荡脉冲喷嘴相结合, 开采砂矿和进行河湖清淤, 并在湖南道县进行了锰结核的现场提升应用, 取得了良好的经济效益和社会效益<sup>[2]</sup>。金文斌等人提出一种测定在垂直向上输送管道内的浮游速度的试验方法, 其利用测定的浮游速度来确定大颗粒物料在垂直管道内的最小输送速度<sup>[3]</sup>。邹伟生对用气力提升深海锰结核的参数进行了研究, 得出了气举扬水特性和扬沙特性随浸入率的变化关系<sup>[4]</sup>。夏建新等人从理论上分析了锰结核在垂直管道中向上输送过程中的压力损失, 得到的计算结果与试验结果非常

收稿日期: 2011-05-03

作者简介: 何湘桂(1985-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为高效射流理论及应用,

E-mail: hexianggui8507@163.com

吻合<sup>[5]</sup>。顾丽莉等人应用G-P法对气-液-固三相流中的分维进行计算,提出采用不含自点的方法估算分维三相流实验数据<sup>[6]</sup>。裴江红等人对影响气举扬砂特性的因素进行了实验研究,认为气举吸口与矿床的间距、浸入率、不同气流喷射角度、气流喷嘴个数以及射流搅拌喷嘴等是影响气举提升特性的因素<sup>[7]</sup>。唐川林等人在进气方式对气举提升性能的影响方面做了一些研究工作,取得了可喜的成果,他们认为气流喷嘴个数、接气管排列方式以及气流喷射角度对气举提升管出口端的排液量、排沙量、沙颗粒浓度以及提升效率有较大影响<sup>[8-9]</sup>。

目前关于气流喷嘴的不同进气方式对气举提升性能影响的研究还不够深入,为此,本文拟研究圆形气腔和方形气腔2种气体喷射器6个气流喷嘴的不同排列方式对气举提升特性的影响。

## 2 实验方案

本次实验中采用气腔外形分别为圆柱体和长方体的圆形和方形气腔,进气管垂直在气腔壁的绳子接头上,压缩空气经过气腔再从气腔盖板上的气流喷嘴沿提升管轴线喷出,兼有气举和射流泵的功效。一方面在气举吸头产生局部真空,周围固体随水流向气举吸头流动;另一方面喷射出来的气体与液体产生动量交换,气泡沿提升管道上浮,举升固液混合物。每个气腔盖板上所钻孔的总当量面积相等,气腔盖板与气腔直接用螺钉连接,每做完1组试验,需把水箱的水放完,换一个气腔盖板,再做下一组实验。

实验中选用粒径为1~3 mm的河沙作为测试颗粒,提升管直径恒为40 mm,供沙量为45 g/s。由于固体颗粒在固-液混合相中所占的体积相对于液体的体积小很多,故在固-液混合相中可以忽略固相的体积,则有

$$C_p = Q_p / Q_L \quad (1)$$

式中:  $C_p$  为固体颗粒质量浓度, g/L;

$Q_p$  为固体颗粒质量流量, g/min;

$Q_L$  为水体积流量, L/min。

实验研究喷嘴不同排列方式和进气量变化对气举提升性能的影响。参数  $Q_p$  和  $Q_L$  通过实验直接测量,  $C_p$  和气举提升效率  $\eta$  则通过计算确定。

气举提升效率  $\eta$  的计算公式为

$$\eta = \frac{\rho_L Q_L^3 + \rho_L Q_L g (L_1 - L_2) + Q_p g L_1 + \frac{Q_p^3}{2A^2 \rho_p^2} - \rho_L g L_2 \frac{Q_p}{\rho_p}}{P_0 Q_g \ln(P_E / P_0)}$$

式中:  $\rho_L$  为液体密度, kg/m<sup>3</sup>;

$A$  为提升管道横截面积, m<sup>2</sup>;

$L_1$  为提升管的总长度, m;

$L_2$  为提升管吸口端到液面的距离, m;

$\rho_p$  为固体颗粒的密度, kg/m<sup>3</sup>;

$P_0$  为大气压强, Pa;

$Q_g$  为注入气量的体积流量, m<sup>3</sup>/s;

$P_E$  为进气口处气体压力, Pa。

实验时,采用有6个气流喷嘴的圆形气腔和方形气腔,设计了6种不同排列方式,如图1所示。

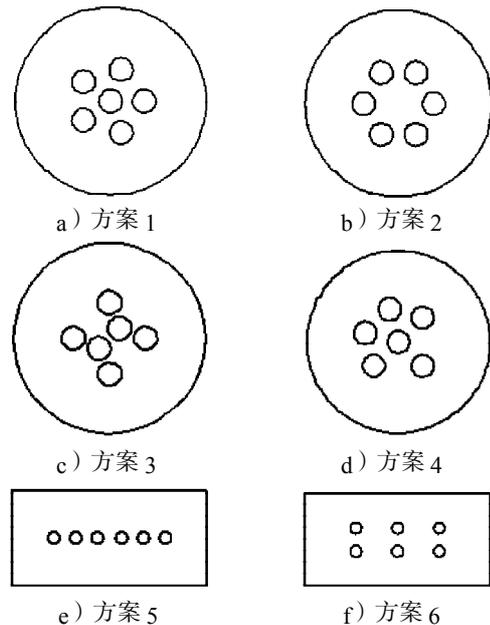


图1 气流喷嘴的排列方式

Fig. 1 Arrangements of air injections

## 3 实验结果及分析

### 3.1 圆形气腔气举提升实验研究

选用方案1~4,通过对比性实验,研究圆形气腔的气举提升管终端出口处水流量、排沙量、沙颗粒的体积质量和提升效率随进气量的变化规律。实验结果见图2~5。

由图2可知,在进气流量一定的条件下,采用方案4时,出口水流量最大;采用方案1时,出口水流量最小;采用方案3和2时,出口水流量差别不太明显,前者略高于后者。分析原因,可能是采用方案4的排列方式时,提升管道中流型更好,更适合于对液体的提升。实验时还发现,随着进气量的增加,4种方案的排水量几乎呈现出一致的变化趋势,排水量随进气量的增加先增加后减小。其原因是随着进气量的增加,提升管中的流型发生了变化。当进气量较小时,提升管中的流型为泡状流,不适合液体的提升;随着进气量的增加,提升管中的流型由泡状流向弹状流发展,而弹状

流更适合液体提升。进气量约为  $7 \sim 8 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 排水量达到最大值。随着进气量的继续增加, 提升管中的流型转变为环状流, 气举对液体的提升能力将减弱。

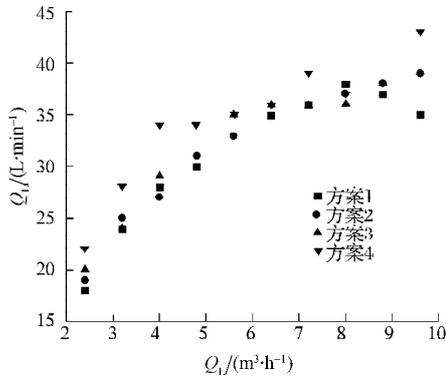


图2 圆形气腔水流量随进气量的变化

Fig. 2 Relevance between water discharged and air flow rate for circular gas cavity

从图3可知, 圆形气腔采用不同排列方式时, 出口端的排沙量差别不太明显。在进气流量一定的条件下, 采用方案4时排沙量较大, 方案1和2次之, 方案3的排沙量最小。这说明圆形气腔气流喷嘴的排列方式对排沙量的影响不大。随着进气量的增加, 提升管出口端的排沙量呈现出与排水量相同的变化趋势, 即排沙量随进气量的增加先增加后减小, 这是因为沙颗粒的运动特性主要由管道中流体特性决定。

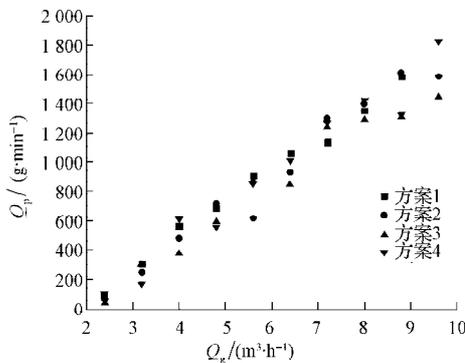


图3 圆形气腔排沙量随进气量的变化

Fig. 3 Relevance between particle discharged and air flow rate for circular gas cavity

由图4可知, 在进气流量一定的情况下, 采用方案1时, 提升管出口端沙颗粒的质量浓度最大, 方案4和2次之, 采用方案3时, 提升管出口端沙颗粒的质量浓度最小。根据能量守恒可知, 当输入能量一定时, 提升管出口端水流量越大其排沙量越少, 故沙颗粒的质量浓度就低; 提升管出口端水流量较小时, 其排沙量较大, 故沙颗粒的质量浓度较高, 但此时提升管道阻力损失也相应增大。随着进气量的增加, 沙颗粒的质量浓度也增大。这是因为

随着进气量的增加, 提升管出口端的排水量和排沙量先增大后减小, 但排沙量增加的幅度比排水量增加的幅度大, 而其减小的幅度也比排水量减小的幅度要大, 所以, 沙颗粒的质量浓度也随进气量的增加而减小。

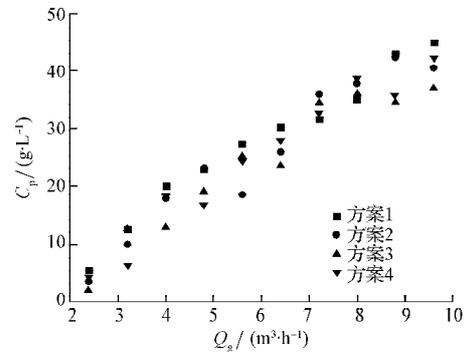


图4 圆形气腔沙颗粒质量浓度随进气量的变化

Fig. 4 Relevance between particles concentration and air flow rate for circular gas cavity

气举提升效率随气流喷嘴排列方式的变化关系如图5。当进气流量较低时, 采用方案4气举的提升效率最高, 方案1气举的提升效率最低。由于采用方案4的排列方式时, 提升管道中流型分布发生变化, 对固-液相提升性能大大加强, 管道阻力损失和额外能量的消耗较小, 因此其提升效率相对于其他几种排列方式要高。当气流量较高时, 不同排列方式对提升效率的影响不明显。从图5还可以看出, 气举提升效率随进气量的增加而下降, 进气量约为  $5.6 \sim 6.4 \text{ m}^3/\text{h}$  时, 提升效率下降较快, 从8%下降至3%左右。

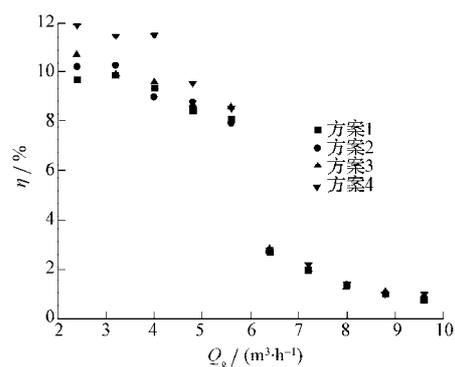


图5 圆形气腔提升效率随进气量的变化关系

Fig. 5 Relevance between lifting efficiency and air flow rate for circular gas cavity

### 3.2 方形气腔气举提升实验研究

选用方案5和6, 对比研究方形气腔的气举提升管终端出口处水流量、排沙量、沙颗粒的质量浓度和提升效率随进气量的变化规律。实验结果见图6~9。

由图6可知, 当进气流量一定时, 采用方案5提

升管出口端的水流量比采用方案6的水流量大,说明采用方案5的排列方式时,气流喷嘴喷出的气体在提升管道中产生了适合液体提升的流型,即弹状流或搅拌流。随着进气量的增加,提升管出口端排水量先增大后减小,这说明提升管内流型发生改变,由泡状流转为弹状流,后又转变为环状流。

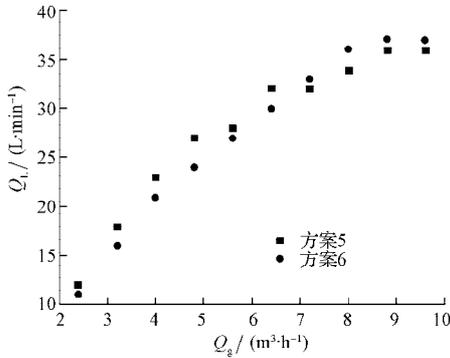


图6 方形气腔水流量随进气量的变化

Fig. 6 Relevance between water discharged and air flow rate for square gas cavity

如图7所示,当进气流量一定时,方案6提升管出口端的排沙量高于方案5的排沙量。这是由于气体的输入能量一定时,根据能量守恒原理,方案5气流喷嘴提升管出口端的水流量大,则其排沙量小;而方案6提升管出口端的排沙量大,则其排水量小。这也说明2种排列方式下提升管中的阻力损失相当。随着进气量的增大,提升管出口端的排沙量呈现先增大后减小的趋势,这也是由于提升管内流型转变,对固-液相的提升能力发生变化所致。

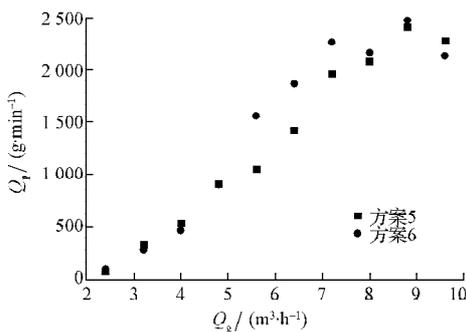


图7 方形气腔排沙量随进气量的变化

Fig. 7 Relevance between particle discharged and air flow rate for square gas cavity

据图8可知,当进气流量一定时,方案6提升管出口端沙颗粒的质量浓度高于方案5沙颗粒的质量浓度。联系排沙量的变化规律分析,因方案5的排水量大而其排沙量小,故其沙颗粒的质量浓度小;方案6的排水量小而其排沙量大,故其沙颗粒的质量浓度大。随着进气量的增大,沙颗粒的质量浓度也呈现先增大后减小的趋势。这说明随进气量的增加,提

升管出口端的排沙量增加的幅度比排水量的幅度大,待质量浓度达到最大值后,其减小的幅度也比排水量的幅度大。

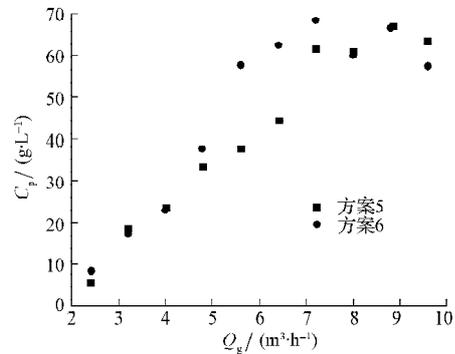


图8 方形气腔沙颗粒质量浓度随进气量的变化

Fig. 8 Relevance between particles concentration and air flow rate for square gas cavity

从图9可见,当进气流量较低时,气举提升效率较高,且方案5优于方案6。这是因方案5提升管道中流型发生变化,对固-液相的提升能力强于方案6。当进气量较高时,不同排列方式对气举提升效率的影响不明显。随着进气量的增加,气举提升效率先增加后减小,进气量约为 $5.6 \sim 6.4 m^3/h$ 时,提升效率下降较快,从7%降至3%以下。气举效率最大值出现在进气量约为 $5.0 m^3/h$ 处,最高效率约为8%,可见气举提升的效率偏低。

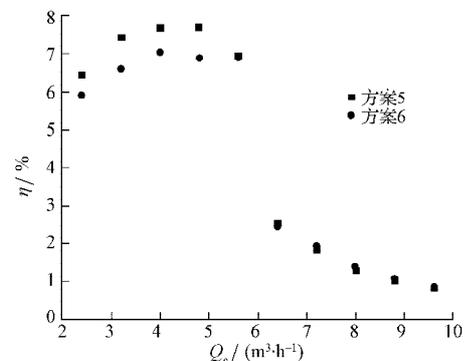


图9 方形气腔提升效率随进气量的变化

Fig. 9 Relevance between lifting efficiency and air flow rate for square gas cavity

所有实验结果均显示,当进气量较小时,不能提升液体,直到进气量达到一定值才能提升液体,这说明存在适合液体提升的临界进气量,在实际进气量达到临界值之前不能提升液体,只有进气量大于临界值时,气举才能提升液体,各种不同排列方案的进气量临界值约为 $2.4 m^3/h$ 。

## 4 结论

本文研究了圆形气腔和方形气腔气流喷嘴的不

同排列方式对气举提升性能的影响。结果表明:

1) 对圆形气腔,在进气量一定的情况下,采用方案4时气流喷嘴的水流量、排沙量最大,总体提升性能较好;采用方案1时气流喷嘴提升管出口端沙颗粒的体积质量最大。

2) 对方形气腔,在进气量一定的情况下,采用方案5时气流喷嘴的排水量最大;采用方案6时气流喷嘴的排沙量和出口端沙颗粒的质量浓度最高,总体提升性能较好。

3) 当进气流量较低时,圆形气腔方案4的提升效率最高,方形气腔方案5的提升效率较高;而当进气流量较高时,不同排列方式对提升效率的影响不明显。

4) 气举存在适合液体提升的临界进气量。

5) 随着进气量的增加,气举提升管出口端的排水量、排沙量、沙颗粒的质量浓度及提升效率呈现出先增大后减小的趋势,但各量出现峰值时对应的进气量不尽相同。所以实践中应考虑工程应用的目的,选择合适的进气量、气腔结构和排列方式。

#### 参考文献:

- [1] 杨林,唐川林,张凤华.水下开采提升气举机电装置的特性及应用[J].矿冶工程,2005,25(2):13-16.  
Yang Lin, Tang Chuanlin, Zhang Fenghua. Performance and Application of Airlift Device Used for Underwater Mining and Lifting[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005, 25(2): 13-16.
- [2] 唐川林,廖振方,张凤华.滨海砂矿开采采用气举和振荡脉冲射流的研究[J].江苏煤炭,2000(1):41-44.  
Tang Chuanlin, Liao Zhenfang, Zhang Fenghua. Study on Airlift and Oscillation Pulsed Jet in Exploiting Deep Beach Placer[J]. Jiangsu Coal, 2000(1): 41-44.
- [3] 金文斌,黄小平,高文鹏.大颗粒物料在垂直管道内最小输送速度的试验研究[J].矿业研究与开发,1997,17(2):17-20.  
Jin Wenbin, Huang Xiaoping, Gao Wenpeng. An Experimental Study on Minimal Transporting Velocity of the Lifted Large-Size Particle Material in Vertical Piping[J]. Mining Research and Development, 1997, 17(2): 17-20.
- [4] 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.  
Zou Weisheng. Air Lift Parameters of Deep Sea Polymetallic Nodule Mining: A Study[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1999, 19(1): 24-27.
- [5] 夏建新,倪晋仁,黄家桢.锰结核在垂直管路输送过程中的压力损失[J].泥沙研究,2002(2):23-28.  
Xia Jianxin, Ni Jinren, Huang Jiazhen. Pressure Loss in Solid-Liquid Flow with Coarse Manganese Nodules in Vertical Pipeline[J]. Journal of Sediment Research, 2002(2): 23-28.
- [6] 顾丽莉,石炎福,余华瑞.气-液-固三相流中压力波动信号的分维估算[J].昆明理工大学学报,2002,27(5):117-120.  
Gu Lili, Shi Yanfu, Yu Huarui. Correlation Dimension of Pressure Fluctuation in Gas-Liquid-Solid Three Phase Co-current Up-Flow System[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2002, 27(5): 117-120.
- [7] 裴江红,廖振方,唐川林.钻孔水力开采提升设备实验分析[J].重庆大学学报,2010,33(3):19-23.  
Pei Jianghong, Liao Zhenfang, Tang Chuanlin. Experimental Analysis on Borehole Hydraulic Lift Equipment[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 19-23.
- [8] 唐川林,胡东,张凤华.进气方式对气举装置提升性能的影响[J].矿冶工程,2008,28(1):9-12.  
Tang Chuanlin, Hu Dong, Zhang Fenghua. Effect of Air-Injection Method on the Performance of Air-Lift Equipment [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(1): 9-12.
- [9] 唐川林,胡东,杨林.气举工作特性的实验与应用[J].煤炭学报,2008,33(3):347-352.  
Tang Chuanlin, Hu Dong, Yang Lin. Experimental and Application of the Air-Lift Performance[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 347-352.

(责任编辑:李玉珍)