

文章编号:1000-582X(2010)03-019-05

## 钻孔水力开采提升设备实验分析

裴江红<sup>1,2</sup>, 廖振方<sup>1</sup>, 唐川林<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044; 2. 湖南工业大学 水射流研究所, 湖南 株洲 412008)

**摘要:**以石英砂模拟井下工况,对钻孔水力开采提升设备气举装置中影响扬砂特性因素进行了实验研究。实验结果表明:气举装置的吸口与矿床间存在最优间距;在供气量相同的条件下,浸入率越大,扬砂量越大;不同气流喷嘴安装角度影响气举的扬砂特性,本实验中喷嘴轴心线方向与提升管内壁切线方向间的夹角为 $10^\circ$ 时,提升效果最佳;气流喷嘴安装数目影响到气举装置的扬砂量,存在最佳喷嘴安装数;搅拌喷嘴是否安装有时是决定能否完成提升的关键因素。

**关键词:**水射流;气举;喷嘴;扬砂特性;钻孔水力开采

中图分类号:TD432;TD421.5 9;TH451;TH137 文献标志码:A

## Experimental analysis on borehole hydraulic lift equipment

PEI Jiang-hong<sup>1,2</sup>, LIAO Zhen-fang<sup>1</sup>, TANG Chuan-lin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;  
2. Modern Jetting Department Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, Hunan, P. R. China)

**Abstract:** Using quartz sands to simulate the work condition, the experiment on the factors of sand lift which influences the lift effect in borehole hydraulic equipment is carried out. The experiment results show that there is an optimum distance between the intake and mineral deposit; under the condition of the same air input capacity; the lifting capacity increases with the submergence proportion; different installation angle of the water nozzle influences the effect of the sand lift; there is an optimally installation angle of 10 degrees between nozzle axial lead and tangential direction of the lift pipe wall; the number of air nozzles affect lifting capacity; the optimally installation nozzles number is 3; and whether fitting stir nozzles or not is the key factor which determines lifting success.

**Key words:** water jet; air-lift; nozzle; sand lift character; borehole hydraulic mining

钻孔水力开采具有基建投资少、建矿周期短、成本低、安全、高效、劳动强度低及环境污染小等优点<sup>[1-3]</sup>,尤其在瓦斯富集或地下水丰富的矿区具有广阔的应用前景<sup>[4-5]</sup>。20 世纪 20 年代美国最早进行了钻孔水力采矿的研究,这种方法不少国家已应用于生产实践,美国用于开采粒状磷灰岩、铀矿、沥青质砂和砂岩,俄罗斯(及前苏联)用于开采钛锆、铁、海兰柱石、褐煤、含金砂、建筑砂、磷灰岩及黏土铀等

矿;南斯拉夫用于石英砂矿;澳大利亚用于淤积类矿床等<sup>[6-7]</sup>;匈牙利用于铝土矿体;印度用于海砂矿。据俄罗斯专家估算,钻孔水力开采的建矿费用只有传统矿山的 10%~50%,开采成本为传统矿山的 50%~60%<sup>[8-10]</sup>。目前,中国在钻孔水力采矿技术领域还处于探索阶段<sup>[11-13]</sup>。

为了使钻孔水力采矿技术能在中国得到很好的发展与运用,对钻孔水力采矿技术中的一些关键技

收稿日期:2009-10-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50504021);教育部科学技术研究重点项目(206122)

作者简介:裴江红(1973-),男,重庆大学博士研究生,主要从事射流理论及应用、机械设计方面研究。

廖振方(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel) 023-65103535;(E-mail) liaozf@263.net。

术进行研究已成为当务之急。钻孔水力开采装置主要由两大部分组成<sup>[3]</sup>，一是破碎装置，二是提升装置。这里只对钻孔水力开采中影响提升装置(气举装置)提升效率的特性进行实验研究，以期能为今后的设计工作提供有价值的实验数据。

### 1 实验原理

钻孔水力采矿的工作原理：在穿过矿层的钻孔内，用下放进孔内的水枪喷出的高压水射流破碎矿层，并在破碎的空间——峒室内形成水和矿石的混合物(矿浆)，再由下入孔内的水力提升器或气举(空气提升器)将矿浆排送到地面。气举提升管内是气相、液相和固相的三相流，三相流(矿浆)的密度小于提升管外液体密度时(由注入管内的空气量和临界速度确定)，矿浆将沿着提升管输送到液面<sup>[14-15]</sup>。

### 2 实验过程

#### 2.1 实验设备和仪表

气举提升系统用的实验设备和仪表：空压机，2.6/5；水泵，1550-32-125；液体流量计，LZB-4；气体流量计，LZB-6。气举装置提升管内径为 100 mm。图 1 为实验现场。

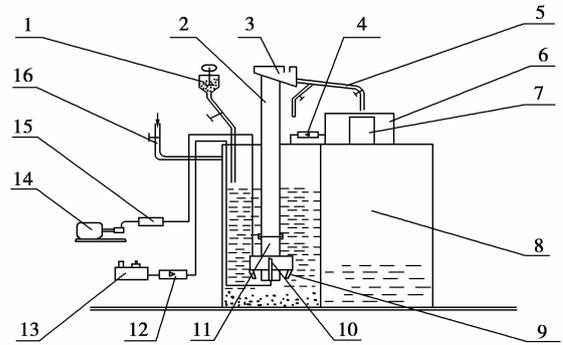


图 1 实验现场

#### 2.2 实验过程

钻孔水力采矿一般只适用于砂状、葡萄状及粉状矿层开采。笔者利用石英砂模拟井下工况，通过供砂箱保证整个实验过程中石英砂的连续供给。实验工作过程原理如图 2 所示。首先调节送水管上节流阀，使水槽水位在整个实验过程中保持一个恒定位置，以便能模拟钻孔水力开采中保持恒定的浸入率；开启空压机，压缩空气沿管路经喷嘴输送到提升管内，压缩空气进入到提升管内的流量值，通过气体流量计读出；实验过程中应逐步增大进入提升管内的气量，使气举装置能完成以下 3 个动作：从不能提升固体颗粒到恰好能提升固体颗粒，正常提升，不能完成提升的过程。分别测得进气量与提升固体颗粒

浓度及效率间关系；启动水泵，水泵产生的低压水经增压器增压后经输送管输送到气举吸口附近处的搅拌用喷嘴喷出，完成破碎及搅拌的双重作用；打开供砂箱上的阀门使砂粒按所需流量供给；气举装置提升的三相混合物(矿浆)进入储存箱，然后进入到有机玻璃槽内完成水与砂子的分离，提升的砂子重量由天平计量，提升水的流量由液体流量计读出。



1. 供砂箱; 2. 提升管; 3. 储存箱; 4. 液体流量计; 5. 输送管; 6. 有机玻璃槽; 7. 集沙箱; 8. 多功能水槽; 9. 水射流喷嘴; 10. 空气喷嘴; 11. 气举装置; 12. 气体流量计; 13. 空压机; 14. 水泵; 15. 增压器; 16. 送水管

图 2 气力提升系统示意图

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 吸头与矿床在不同间距下的扬砂特性

在实验过程中保持空气流量恒定。图 3 表明扬砂量随吸头与矿床间距(-15~25 mm)的变化趋势(吸口面与砂箱内石英砂表面相齐为参考位置 0 处，参考面上取正，下为负)。吸头与矿床间距在参考位置 0 处上 3 mm，下 8 mm 分别对应一个扬砂量的极值点；水射流的喷嘴数  $N=6$  时，最大吸砂量为 600 g/s， $N=0$  时(不用水喷嘴)为 380 g/s，表明水射流喷嘴的有无对气举的扬砂量有较大影响。吸头与矿床间的间距影响扬砂特性的原因是由于其间的环形缝隙的水的流场特性将对固体颗粒的曳引力和液、固两相间的摩擦力产生影响。

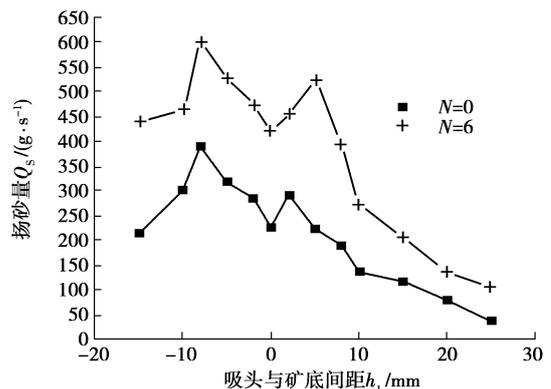


图 3 吸头与矿床不同间距下扬砂特性图

### 3.2 水相速度的影响

当气举装置工作时,吸头与矿床间的流体将以一定的速度  $v_A$  流动,一般而言,只有当  $v_A$  达到一定值时,砂矿颗粒才会开始与矿体分离,进入吸管。 $v_A$  的最小值  $v_{Amin}$  由克诺罗兹公式确定<sup>[6]</sup>

$$v_{Amin}/g = bh^{0.24}d_m, \quad (1)$$

式中: $b$  为经验常数; $h$  为水深, m;  $d_m$  为砂矿的平均粒径, m。

当吸管与工作面之间的距离  $h_1$  一定时(也即浸入率保持恒定),环形空间水流的平均速度

$$v_A = \mu \sqrt{2\Delta P/\rho_m}, \quad (2)$$

或 
$$v_A = v_{m1}D/(4h_1), \quad (3)$$

式中: $\rho_m$  为水、砂混合液的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta P$  为吸管中的真空度, Pa;  $v_{m1}$  为吸管中液固混合液的平均速度, m/s;  $h_1$  为吸头与矿床间的距离, m;  $D$  为吸管直径, m;  $\mu$  为流量系数。

由式(2)、(3)可知,水流的平均速度  $v_A$  与吸管内真空度  $\Delta P$ 、吸头与矿床间的距离  $h_1$ 、矿石的平均粒径  $d_m$  等参数有关。吸管内真空度  $\Delta P$  与空气喷嘴的结构参数及压缩空气的流量、压力等因素有关。根据气体方程可得

$$v_{g1} = [v_{g0}^2 + 2K/(K-1)(P_{g0}/\rho_{g0} - P_{g1}/\rho_{g1})]^{0.5}, \quad (4)$$

式中: $K$  为气体等熵指数,取 1.4;  $P_{g0}$ 、 $\rho_{g0}$ 、 $v_{g0}$  分别表示空气喷嘴进气口处压缩空气的压力、密度、速度;  $P_{g1}$ 、 $\rho_{g1}$ 、 $v_{g1}$  分别表示空气喷嘴出气口处压缩空气的压力、密度、速度。

对吸入口到进气口间液体为研究对象运用动量守恒定律求得

$$\Delta P = \rho_m v_{m1}^2 - [2g\rho_{g1}v_{g1}Q_{g1}/A - (1 - \alpha_g)(\rho_m v_{m2}^2)], \quad (5)$$

$$v_{m2} = Q_m/(1 - \alpha_g)A, \quad (6)$$

$$v_{m1} = Q_m/A, \quad (7)$$

式中: $Q_m$  为吸入管内液固混合液的平均流量, m<sup>3</sup>/s;  $v_{m1}$  为液、固混合液在吸入管截面处的平均速度, m/s;  $v_{m2}$  为进气口截面处液、固混合液的平均速度, m/s;  $A$  为吸入管的截面面积, m<sup>2</sup>;  $\alpha_g$  为气体的空隙率;  $Q_{g1}$  为空气喷嘴出口截面处流量, m<sup>3</sup>/s。

将式(4)、(5)、(6)、(7)代入式(2)、(3)并整理可得到

$$h_1 = \frac{D}{4} \frac{1}{\mu \sqrt{2 - 2 \left[ \frac{2g\rho_{g1}v_{g1}Q_{g1}}{Q_m v_{m1}} - (1 - \alpha_g) \left( \frac{v_{m2}}{v_{m1}} \right)^2 \right]}}. \quad (8)$$

式(8)表明:水相平均速度  $v_{m1}$  是一个受  $h_1$ 、 $D$ 、 $v_{g1}$  和  $v_{m2}$  综合影响的变化量,也间接反映了吸头与矿床间流场特性的复杂性,从而也直接影响到了  $h_1$  与扬砂量。

### 3.3 不同浸入率下的扬砂特性

浸入率定义为  $\gamma = L_2/L_1$ , 式中  $L_2$  表示由进气口到液面间距离,  $L_1$  表示由进气口到提升管出口断面间距离,不同浸入率下的扬砂特性见图 4。

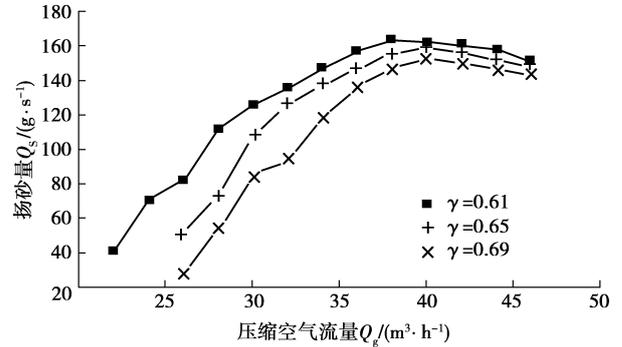


图 4 不同浸入率下的扬砂特性

从图 4 可以看出:不同浸入率下的扬砂特性曲线相似,当进气量达到某一值时才能提升固体颗粒砂子,随后气举装置的扬砂量随进气量的增加而增大,当达到最大提升量后扬砂量随进气量的增加而减小直至不能提升固体颗粒砂子;在相同进气量下,砂子的提升量随浸入率的增加而增大;不同浸入率下砂子最大提升量所对应的进气量不一样,浸入率越大时砂子最大提升量所对应的进气量越小。不同浸入率下的扬砂效率曲线变化规律与扬砂特性类似,见图 5。

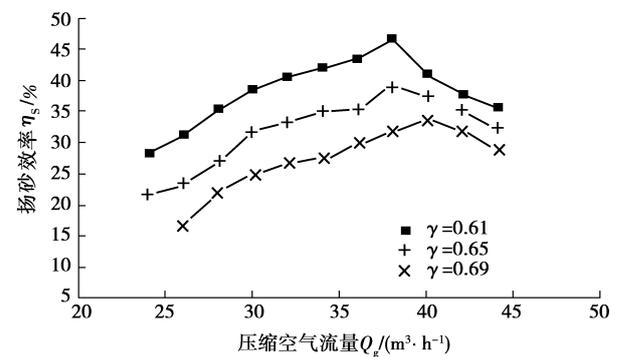


图 5 不同浸入率下的提升效率

从图 5 可以看出,最大扬砂量在 3 种浸入率下,对应的压缩空气流量均为 38 m<sup>3</sup>/h 左右。分析其原因在于砂子是悬浮在水里并随之一起运动,根据固体颗粒提升的条件可知只有当三相流中的流型为团状流时才能完成对固体颗粒的提升,气举装置提升管内的进气量逐渐增大时管内的流型要经历从气泡流—团状流—泡沫流的过程,故只有当进气量达到某一值时才能完成对砂子的提升。当三相流进入到团状流时, Taylor 泡的数量随着进气量的增加先增多而后减少,而 Taylor 泡的数量是决定提升砂量的

重要因素<sup>[1-5]</sup>,故出现了气举装置的扬砂量随着进气量的增加先增多而后减少这一现象。浸入率越大则将砂子提升到出口面所需的功就越小(提升固体颗粒克服由吸头到提升管出口断面在重力与浮力作用下所需要的功,克服液体由水平面到提升管断面重力所做的功),根据能量守恒得到在相同进气量下砂子的提升量随浸入率的增加而增大。

图 5 表明:当  $\gamma$  为 0.61、0.65 和 0.69 时扬砂效率分别为 30%、38% 和 46%,扬砂效率随浸入率的增大显著提高,而利用钻孔水力开采时其浸入率几乎等于 1,由此可以预见通过水力钻孔采矿的提升效率是很高的,能获得较好的经济效益。

### 3.4 不同气流角度下的扬砂特性

不同气流角度下的扬砂特性见图 6。

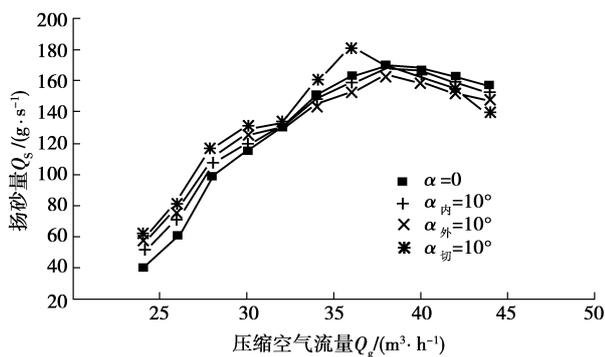


图 6 不同气流角度下的扬砂特性

实验条件:浸入率  $\lambda=0.65$ ,安装的喷嘴数量为 3,调节喷嘴与提升管轴向或管壁切向方向上的夹角。图 6 中  $\alpha$  代表喷嘴与提升管轴向方向夹角,“内”表示喷嘴轴心线远离管壁方向偏离,“外”表示喷嘴轴心线靠近管壁方向偏离,“切”表示喷嘴轴心线沿管内壁切向方向。

图 6 实测数据表明:喷嘴安装不同的角度对水的临界提升量有着不同的影响。当压缩空气流量为  $36 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha_{\text{切}}=10^\circ$  时,扬砂量最大达  $170 \text{ g/s}$ ;压缩空气流量为  $37.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha_{\text{内}}=10^\circ$ 、 $\alpha_{\text{外}}=10^\circ$  均可达到各自的最大扬砂量。 $\alpha_{\text{切}}=10^\circ$  时达到最大扬砂量所需的压缩空气流量最小。砂子的提升量随着进气量的增大依次按  $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha_{\text{内}}=10^\circ$ 、 $\alpha_{\text{外}}=10^\circ$  和  $\alpha_{\text{切}}=10^\circ$  的顺序而增大,然后重合,随后各自达到最大提升量,最后按  $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha_{\text{内}}=10^\circ$ 、 $\alpha_{\text{外}}=10^\circ$  和  $\alpha_{\text{切}}=10^\circ$  的顺序而减小。分析其原因在于随着安装角度的不同,提升管内的三相混合物可以在管内形成不同的旋转,而适当的旋转方向更有利于多相流中的流型从气泡流到团状流的转变。同时根据功的转化原理,当所需功相同时流体运动的行程越长则所需的力也越小,故出现了砂子的提升量随着进气量的增

大依次按  $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha_{\text{内}}=10^\circ$ 、 $\alpha_{\text{外}}=10^\circ$  和  $\alpha_{\text{切}}=10^\circ$  的顺序而增大,然而流体运动行程的增加使得其产生的摩擦阻力也越大,故当进气量超过一定范围后出现各自达到最大提升量最后按  $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha_{\text{内}}=10^\circ$ 、 $\alpha_{\text{外}}=10^\circ$  和  $\alpha_{\text{切}}=10^\circ$  的顺序下降现象。

### 3.5 不同空气喷嘴个数下的扬砂特性

相同条件下空气喷嘴安装数目对砂子的提升量的影响见图 7。

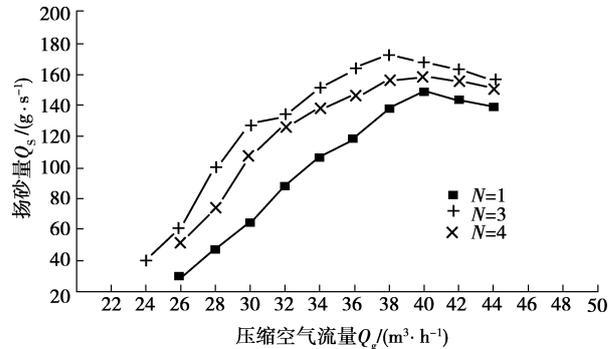


图 7 不同安装喷嘴个数的扬砂特性图

空气喷嘴个数为 3、压缩空气流量为  $38 \text{ m}^3/\text{h}$  时,砂子的最大提升量达到  $170 \text{ g/s}$ ;空气喷嘴个数为 1 和 4,压缩空气流量为  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  时,砂子最大提升量分别为  $140$ 、 $150 \text{ g/s}$ 。空气喷嘴个数为 3 相比空气喷嘴个数为 1、4,达到最大扬砂量所需压缩空气流量最小。这表明空气喷嘴个数对扬砂量存在一最佳个数,在本实验中为 3。分析其原因,笔者认为在提升管内不同位置安装不同个数的喷嘴可以影响到提升管内的流型变化,合适的喷嘴安装位置及数目可以使提升管内的流体流型尽快地从气泡流向团状流转变且能使团状流中的 Taylor 泡得到充分的发展<sup>[5-12]</sup>。扬砂特性和提升效率曲线变化趋势与不同浸入率下的扬砂特性和提升效率曲线变化趋势相同,其原因也与前面所述内容相同。关于安装喷嘴个数影响气举装置提升特性这一观点目前还未见其他文献报道过。

### 3.6 水喷嘴数量对扬砂特性的影响

水喷嘴数量对扬砂特性的影响见图 8。图 8 表明搅拌用喷嘴的安装对于砂子的提升量有非常大的影响,没安装搅拌喷嘴的砂子最大提升量为  $150 \text{ g/s}$ ,搅拌喷嘴的数量分别为 6 和 3 时,最大扬砂量分别为  $425$ 、 $420 \text{ g/s}$ 。不安装搅拌喷嘴与安装搅拌喷嘴相比较,两者最大扬砂量相差 2.84 倍。搅拌喷嘴个数为 6 和 3 时所对应的最大扬砂量相差不大,这表明当安装的搅拌喷嘴达到了搅拌作用后,再增加搅拌喷嘴的数量意义不大。本实验中的砂子是疏松地堆放在吸入口,故在没安装搅拌喷嘴时气举

装置仍能提升砂子,笔者曾利用气举抽吸某钢厂沉淀池的钢渣,发现不安装搅拌喷嘴根本无法抽吸钢渣。搅拌喷嘴的压力不能太低也不能太高,压力太低起不到搅拌的作用,压力太高又会在吸入口周围形成一道高压水墙阻碍矿渣或固体颗粒向吸入口处的移动,所以在工程实践中搅拌喷嘴的压力一定要选择合适(这要由抽吸的矿层特性来决定)。

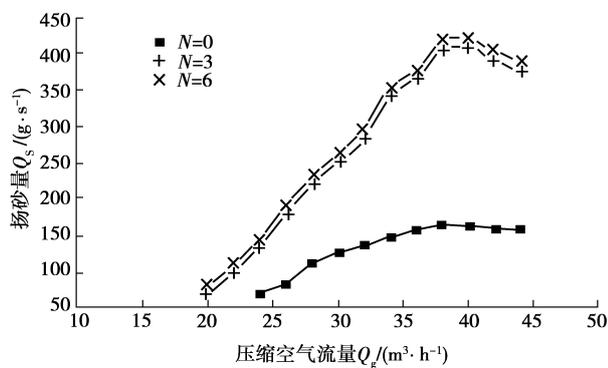


图8 不同搅拌嘴下扬砂特性图

## 4 结 论

1) 利用气举装置的钻孔水力采矿新方法,可以减少开发成本、减小环境污染和水土流失,是一种新型特殊采矿工艺。

2) 利用气举进行水力钻孔采矿时,因影响固体颗粒提升量和提升效率的因素很多,在工程实践中应注意综合考虑不要顾此失彼。

3) 笔者主要从实验的角度对气举装置的提升固体颗粒量和提升效率进行了分析,但在工程实践中应从经济效率角度出发,而不能单纯追求高提升效率。

### 参考文献:

[1] 杨林,唐川林,张凤华. 地下矿产钻孔水力开采技术及其应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 662-665.  
YANG LIN, TANG CHUAN-LIN, ZHANG FENG-HUA. The technology of hydraulic borehole for underground mining and its application [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(4): 662-665.

[2] 夏柏如,曾细平,毛志新. 一种钻孔水力采煤系统的研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 36-40.  
XIA BAI-RU, ZHENG XI-PING, MAO ZHI-XIN. Research on one borehole hydraulic coal mining system [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 36-40.

[3] 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 CHUAN-LIN, HU DONG, YANG LIN. Experimental and application of the air-lift performance [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 347-352.

[4] 袁丹青,王冠军,乌骏,等. 多喷嘴射流泵数值模拟及试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 95-99.  
YUAN DAN-QING, WANG GUAN-JUN, WU JUN, et al. Numerical simulation and experiment study on multi-nozzle jet pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 95-99.

[5] ERIANN F F, PEASE L F. Three-phase upward flow in a vertical pipe [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(5): 498-509.

[6] 王常斌,林建忠,石兴,等. 射流泵湍流场的数值模拟与实验研究[J]. 高校化学工程学报, 2006, 20(2): 170-179.  
WANG CHANG-BIN, LIN JIAN-ZHONG, SHI XING, et al. Numerical simulation and experiment on the turbulent flow in the jet pump [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2006, 20(2): 175-179.

[7] LIANG N K, PENG H K. A study of air-lift artificial upwelling [J]. Ocean Engineer, 2005, 32(2): 731-745.

[8] KASSAB S Z, KANDIL H A, WARDA H A, et al. Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009, 30(1): 88-98.

[9] MICHIO S, AKIMARO K, FUMINORI M, et al. An advanced microbubble generator and its application to a newly developed bubble-jet-type air lift pump [J]. Multiphase Science and Technology, 2007, 19(4): 323-342.

[10] POUGATCH K, CUDEAM M. Application of CFD methods to the analysis of the flow in air-lift pump [C/OL] // 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA, June 10-15, 2007. [2008-07-14]. [http://d.wanfangdata.com.cn/NSTLHY\\_NSTL\\_HY16004392.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/NSTLHY_NSTL_HY16004392.aspx).

[11] 邹伟生,黄家桢. 大洋锰结核深海开采扬矿技术[J]. 矿冶工程, 2006, 20(3): 320-325.  
ZHOU WEI-SHENG, HUANG JIA-ZHEN. Lifting technology for mining deep-sea manganese nodule [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 20(3): 320-325.

[12] PRASSER H M, KREPPER E, LUCAS D. Evolution of the two-phase flow in a vertical tube; decomposition of gas fraction profiles according to bubble size classes using wire-mesh sensors [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2002, 41(1): 17-28.

[13] KASSAB S Z, KANDIL H A, WARDA H A. Experimental and analytical investigations of airlift pumps operating in three-phase flow [J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 131(1/3): 273-281.

[14] LILJEGREN L M, BAMBERGER J A. Pneumatic conveying of wet and dry solids through a vertical pipe [J]. American Society of Mechanical Engineers Fluids Engineering, 1995, 228(1): 401-408.

[15] ROBÖLE B, KVANDAL H K, SCHÜLLER R B. The norsk hydro multi phase flow loop: a high pressure flow loop for real three-phase hydrocarbon systems [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(3): 163-170.

(编辑 张 菁)