

文章编号:1000-582x(1999)03-0079-06

19

滨海砂矿开采新方法的研究

79-84

唐川林, 廖振方

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

TD806

摘要:提出了一种用气举和自激振荡脉冲射流相结合的方式开采潜水层滨海砂矿的新方法。研究了气举的数学和物理模型,探讨了自激振荡脉冲射流作为气举装置破碎器的可行性。理论和实验表明:自激振荡脉冲射流不仅能破碎水下土层,而且能松散砂矿颗粒,使砂矿颗粒易于进入气举吸头。

关键词:气举;滨海砂矿;自激振荡;射流;喷嘴

中图分类号:TD 421.59

文献标识码:A

砂矿开采

在我国沿海地区如海南岛、辽东半岛、山东半岛、广东等地具有丰富的海滨砂矿资源,其砂矿床的矿物组成主要为锆英石、金红石、独居石、钛铁矿和自然金等。通过近几十年的开采,目前水面以上的砂矿资源已消耗殆尽。故水面以下的砂矿开采就显得非常重要。水下浅层的砂矿可用链斗式采砂船或砂泵抽取的方式进行开采。但对深层(水下7 m以下)砂矿而言,用这些方法开采就存在以下问题:

i) 从理论上讲只能开采水下7 m以上的疏松矿物,而大量位于水下7 m的高品位砂矿得不到有效开采,资源浪费严重;ii) 对滨海砂矿中存在的硬土层、粘土层无能为力,需借助爆破才能抽取;iii) 砂泵叶轮的磨损严重,短则几天多则两周就要更换叶轮;iv) 设备操作不便。

为此,作者提出用气举(Airlift,也可称为气力提升泵)和自激振荡脉冲射流相结合的方法来开采滨海砂矿。与砂泵相比,这种方法具有①利用振荡脉冲射流能破碎IV-VI级土岩,能使开采与抽取同时进行;②能开采水下几米至数百米处的矿层;③工作部件无旋转零件,磨损小;④设备简单、工作可靠、能连续工作的优点。

1 气举的组成与工作原理

1.1 气举的组成

现场气举实验(工作)装置如图1所示。它由提升机构、垂直输送管、空气喷射器、射流破碎装置,送水管和输气管组成。提升机构的功用在于将气举机构按一定速度逐步放入水中或提出水面。送水管将离心泵输出的压力水送入射流破碎器。空压机输出的压缩空气经

• 收稿日期:1998-06-16

基金项目:西南石油学院油气藏重点实验室基金资助项目

作者简介:唐川林(1963-),男,湖南邵东人,重庆大学副教授,博士。

气包进入空气喷射器。

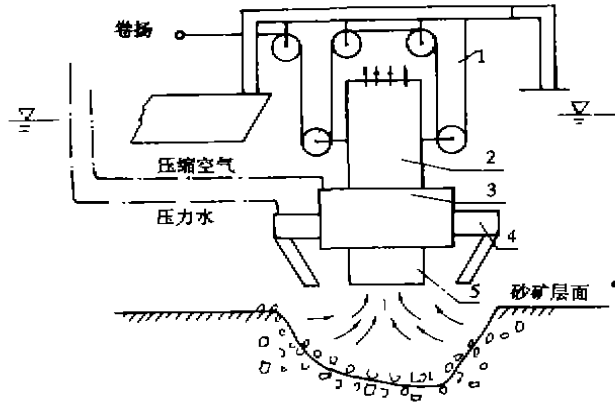


图1 现场试验用气举装置简图

1—提升机构;2—垂直输送管;3—气体喷射器;4—射流破碎器;5—吸头

1.2 气举矿砂的工作原理

当压缩空气经气包、送气管进入空气喷射器时,它就与轴线成一定角度对称布置的数个喷嘴中高速流出;高速气流一方面与输送管中液体产生强烈的动量交换,在空气喷射器的下端(气举吸头)形成局部真空;另一方面则在管内生成了比水的密度轻的气-水-砂混合物。这样就将水底下疏松的砂矿源源不断地抽取出来。如图2所示,砂矿的抽取量基本上决定于通过吸管口与土岩表面之间环形间隙中水流的平均速度 V_A 。当

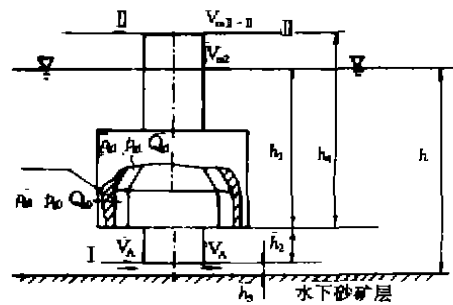


图2 气举的简化模型

吸管与工作面之间的距离 h_3 一定时,环形空间水流的平均速度可按下式确定:

$$V_A = \mu \sqrt{2 \Delta P_p / \rho_m} \quad (1)$$

或

$$V_A = V_{m1} D / (4 h_3) \quad (2)$$

式中: ρ_m ——水砂混合液密度, kg/m^3 ; ΔP_p ——吸管中的局部真空度, Pa; V_{m1} ——吸管中液固混合液的平均速度, m/s ; h_3 ——吸头与砂矿床之间的距离, m;

D ——吸管直径, m; μ ——流量系数。

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:

$$V_{Amin}^2 / g = b h^{0.24} d_m \quad (3)$$

式中 b ——经验常数; h ——水深, m; d_m ——砂矿的平均粒径, m。

从方程(1)、(2)、(3)可见, V_A 与吸管内的局部真空度 Δp , 水深, 砂矿粒径等参数有关。其中 Δp 影响最大。而其次与空气喷射器的结构参数及压缩空气的流量、压力等有关。如图2所示, 设空气喷嘴进出口气流的压力、速度和密度分别为 $p_b, V_b, \rho_b, p_d, V_d, \rho_d$, 则有:

$$V_d = [V_b^2 + 2K/(K-1)(p_b/\rho_b - p_d/\rho_d)]^{1/2} \quad (4)$$

式中 K ——气体等熵指数, 对于空气 $K = 1.4$ 。

通过气体喷射器产生的压力损失可利用动量守恒原理求得:

$$\Delta p = \rho_m V_m^2 - [\alpha_g \rho_g V_g Q_m / A - (1 - \alpha_g)(\rho_m V_m^2)] \quad (5)$$

$$V_m = Q_m / (1 - \alpha_g) A \quad (6)$$

$$V_m = Q_m / A \quad (7)$$

$$\Delta p_b = \Delta p \quad (8)$$

式中 α_g ——气体的空隙率; Q_m ——液固混合液的平均流量, m/s; V_m ——输送管中液固混合液的平均速度, m/s; A ——输送管与吸管的截面积, m²; Q_d ——空气喷嘴出口处空气的流量, m³/s。

从(1)~(5)可见, 调整输送管和吸管直径、改变空气喷嘴参数及压缩空气压力、流量, 就可使气举装置的抽取量达到最佳范围。

1.3 气举的效率

压缩空气经喷嘴进入, 通过输送管后流入大气。设压缩空气压力从 p_b 变化至 p_s 的过程为等温过程, 则压缩空气的输入能量 E_1 为:

$$E_1 = p_b Q_b \ln(p_b/p_s) \quad (9)$$

式中 p_s ——大气压, MPa; Q_b ——压缩空气流量, m³/s。

设抽取的水量为 Q_w , 砂量为 Q_s , 水和砂的密度分别为 ρ_w 和 ρ_s , 则将砂矿从水底提升至出口所需要的能量 E_2 为^[2]:

$$E_2 = \rho_w g Q_w (h_4 - h_1) + Q_s [g(\rho_s - \rho_w)(h_1 + h_2) + \rho_s g(h_4 - h_1)] \quad (10)$$

式中 h_1 ——水面至空气喷嘴出口处的距离, m; h_2 ——吸管长度, m; h_4 ——气举装置气固混合液出口处至空气喷嘴出口处的距离, m。

因此, 气举的效率 η 为:

$$\eta = E_2/E_1 = \frac{\rho_w g Q_w (h_4 - h_1) + Q_s [g(\rho_s - \rho_w)(h_1 + h_2) + \rho_s g(h_4 - h_1)]}{P_s Q_b \ln(p_b/p_s)} \quad (11)$$

1.4 液固混合液的输送量 Q_m

若不考虑空气的可压缩性及其动量变化, 抽吸和输送过程稳定。则对图2所示的 I-I 和 II-II 横截面运用动量守恒原理可得:

$$J_2 - J_1 = F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 \quad (12)$$

式中 J_2, J_1 ——分别为作用在截面 II-II 和 I-I 上的动量, m·kg/s²;

$$J_2 = A \rho_m V_{mII-II}^2 = A \rho_w (V_m + C_v V_s)^2 (1 - C_v) + A \rho_s C_v (V_m + C_v V_s - V_s)^2$$

$$J_1 = A \rho_m V_{mI-I}^2 = A \rho_w (V_m + C_v V_s)^2 (1 - C_v) + A \rho_s C_v (V_m + C_v V_s - V_s)^2$$

$$F_1 \text{——作用在截面 I-I 上的力, } F_1 = \rho_w g(h_1 + h_2)A + p_s \cdot A \text{ N;}$$

$$F_2 \text{——作用在截面 II-II 上的力, } F_2 = p_s \cdot A \text{ N;}$$

F_3 ——管内水的重力, $F_3 = \rho_1 g \bar{\alpha}_L h_4 A + \rho_2 g(1 - \bar{\alpha}_L) h_2 A$, N;

F_4 ——管内固体颗粒重力, $F_4 = \rho_s g \bar{\alpha}_s h_4 A + \rho_s g c_v h_2 A$, N;

F_5 ——管内摩擦阻力, $F_5 = F_{5,b_2} + F_{5,b_4}$, N;

F_{5,b_2} ——吸管内固液两相流的摩擦阻力, N; F_{5,b_4} ——垂直输送管内气液固三相

流的摩擦阻力, N; $\bar{\alpha}_L$ ——液相的平均体积率; $\bar{\alpha}_s$ ——固相的平均体积率;

c_v ——混合液中固相的体积分数; V_s ——固体颗粒在垂直管中的沉降程度, m/s.

根据(12)式,就可计算出 V_{m2} 和 V_{m4} ,从而得出抽吸量 Q_m :

$$Q_m = Q_L + Q_S = AV_{m4} \tag{13}$$

图3为计算的砂、液量随压缩空气流量的变化关系。其中主要参数为管径 $D = 175$ mm, 管长为2000 mm, 砂粒粒径 $d_s = 0.5 \sim 1$ mm, $\rho_s = 2.5$ g/cm³, $Q_{a0} = 0 \sim 24$ m³/min, $p_{a0} = 0.2 \sim 0.7$ MPa.

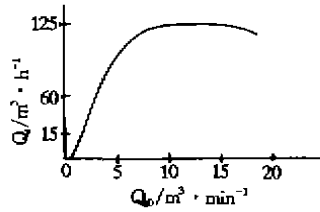


图3 抽吸砂量随压缩空气流量的变化

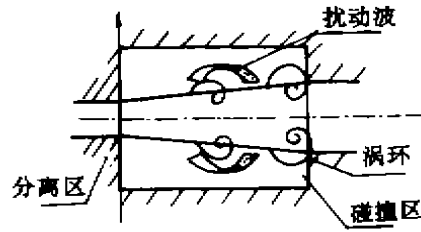


图4 自激喷嘴原理图

2 振荡脉冲射流作为气举破碎器

一般而言,只有水下砂矿没有粘结或经过预先松散,气举装置才能顺利地吸取砂矿颗粒。但在实际操作过程中,水下砂矿床不是松散的。以作者进行现场试验的海南某砂矿床为例,它的地质剖面如图6所示。其中很坚硬的土岩层(包括红色或白色粘土,碎石等)用传统的土岩松散方法即铰刀、斗轮松散器和普通水力松散器是无能为力的。现在一般都是采用水下爆破的方式。这种方法在实际使用中极不方便,也不安全,整体效率低。因此作者采用了振荡脉冲射流作为破碎器配合气举连续作业的方案。

2.1 振荡脉冲射流原理

如图4所示,当一股射流或剪切流向下流动时,射流中一定频率范围内的涡量扰动得到放大。在剪切层中形成一连串离散涡环,当其到达碰撞壁并与之相互作用时,在碰撞区产生压力振荡波,该波以声速向上游传播,又诱发新的涡量脉动。若分离区与碰撞区的压力脉动相互为反相,就会形成涡量扰动-放大-新涡量脉动产生的循环过程。该过程

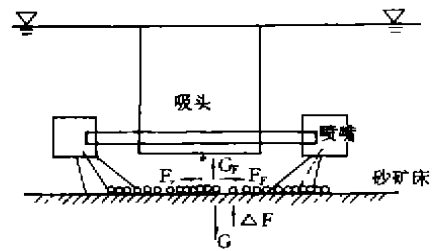


图5 作用在砂矿颗粒上的作用力

不断重复,就会形成强烈的自激振荡射流。室内和现场实验表明,水下土岩工作面在气举和振荡脉冲射流的共同作用下,逐渐形成了一漏斗状大坑。砂矿颗粒在脉冲射流冲击形成的振荡径向流动的作用下,向气举吸口移动,如图 5 所示。作用在砂矿颗粒上的力有重力 G 、浮力 G_F 、径向流动的推力 F_r 、摩擦力 F_f 和振荡脉冲射流的作用力 ΔF 。

$$G = \frac{4}{3} \pi (d_m/2)^3 \rho_s g \tag{14}$$

$$G_F = \frac{4}{3} \pi (d_m/2)^3 \rho_l g \tag{15}$$

$$F_r = k\pi (d_m/2)^2 \rho_l V_r^2/2 \tag{16}$$

$$F_f = f_1 \left[G - G_F + (\rho_s + \rho_l g h_0) \pi \left(\frac{d_m}{2} \right)^2 - \Delta F \right] \tag{17}$$

式中 f_1 ——砂矿颗粒之间的摩擦系数; k ——实验常数。

要使砂矿颗粒向气举吸口移动,必须有:

$$F_r > F_f \tag{25}$$

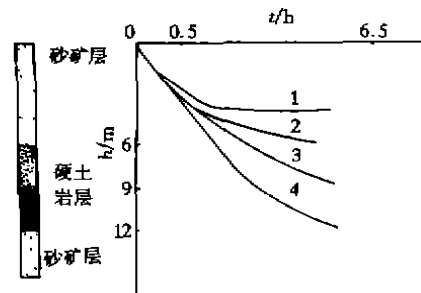
由(16)式可见,振荡脉冲射流引起的径向流速 V_r 越大,推动砂粒向吸口运动的力 F_r 越大。另一方面,由于振荡脉冲射流脉动率高,使得脉动射流的作用力 ΔF 变化较大,甚至为负值(方向向上),这就使得砂粒与矿床之间的摩擦力减小也有助于砂粒向吸口移动。这在现场实验中得到了证实。一般而言,径向流速 V_r 受振荡脉冲射流脉动特性、射流角度、喷嘴数量、位置、离土岩表面的距离以及距射流冲击中心的距离等参数密切相关。

3 气举及振荡脉冲射流在滨海砂矿上的应用

经过理论分析计算和室内实验,作者设计了一套装有自激振荡脉冲射流喷嘴的气举装置,并在海南某海滨砂矿进行了工业试验。气举空气喷嘴的当量直径为($\Phi 25 \sim \Phi 40$ mm)可以无级调节。采用两台并联压气机供气,气压为 0.7 MPa,流量为 $0 \sim 24 \text{ m}^3/\text{min}$ 。振荡脉冲射流破碎器采用多级离心泵供给压力水,其扬程为 120 m,流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 。振荡脉冲喷嘴的布置有三种方案:①沿径向均匀布置三个不等径喷嘴;②沿径向均布三个等径喷嘴;③沿径向均布六个等径喷嘴。

现场实验表明,采用常规喷嘴的气举装置,在其抽取砂矿的过程中碰到硬土层时,其下降速度非常缓慢,排出的混合液几乎是清水。若换上振荡喷嘴,由于

其优越的破碎能力,故能快速破碎土岩,使气举装置快速下降至深处抽取砂矿。图 6 就是记录的抽取深度与时间的关系。从图中可见,装有振荡喷嘴的气举装置其下降速度要比装有常规喷嘴的气举装置的下降速度大很多。另外值得注意的一点就是采用不等径振荡喷嘴组合



- 1: 普通射流喷嘴; 2: 三个等径自激振荡喷嘴;
- 3: 六个等径自激振荡喷嘴;
- 4: 三个不等径自激振荡喷嘴。

图 6 气举装置抽取(开挖)深度 h 与时间 t 的关系

的方案比等径方案要好得多,这可能与不等径振荡喷嘴在水下产生的不稳定流场有关(另文专门讨论)。

就抽取的砂水混合液的浓度 C_c 而言,采用振荡脉冲喷嘴和普通喷嘴在相同条件下其浓度分别为 20% ~ 45% 和 10% ~ 15%。这就说明振荡脉冲射流既能有效破碎土岩,又能改善水下土岩表面的径向流场,使砂矿颗粒易于流动,增大抽吸浓度。

4 结 论

- 1) 实验和理论分析表明气举和振荡脉冲射流喷嘴特别适合于开采潜水层下滨海砂矿。
- 2) 气举装置具有高效、结构简单和连续作业的优点。
- 3) 在相同条件下,振荡脉冲射流破碎土岩的效果优于连续射流。
- 4) 振荡脉冲射流冲击土岩时造成的径向流动使得砂矿颗粒更易于向吸口移动,有助于增大气举抽吸浓度。

参 考 文 献

- [1] ZHENFANG LIAO, CHUANLIN T. A New Type of Nozzle for oil Well Drill Bits. Proceedings of the 10th International Symposium on Jet Cutting Technology[C] (1990). London: Elsevier Science Publishers Ltd. UK, 1991. 135 ~ 144
- [2] ETIENNE BERLEUR, MICHEL GIOT. Application of the Airlift Principle to Solve Maintenance Problems[A], Stephens H S 10th International Conference on the Hydraulic Transport of Solids In Pipes[C], 1986. 109 ~ 121
- [3] YOKIMARU SHIMIZU, Shogo Nakamura, Sadao Kuzohara. Studies of the Configuration and Performance of Annular Type Jet Pumps. Journal of Fluids Engineering, 1987, 109: 205 ~ 211
- [4] 孙盛湘. 砂矿床露天开采. 北京: 冶金工业出版社, 1985

The Study on the New Method for Exploiting Deep Beach Placer

TANG Chuan-lin, LIAO Zhen-fang

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: The method using the airlift and the self-excited oscillation jet for exploiting deep beach placer has been presented. The physical and mathematical model of airlift is given in this paper. The feasibility of the self-excited oscillation pulsed jet as breaker of the airlift is researched. It has been shown theoretically and experimentally that the self-excited oscillation pulsed jet not only crushes and looses ore deposit under water, but also lifts particles of solid on the clay and sand bed. The oscillation cross flow caused by the self-excited oscillation jet makes particles of solid enter the end of the suction pipe.

KEYWORDS: airlift; beach placer; self-excited oscillation; jet; nozzle

(责任编辑 刘尚坤)