

# 大洋采矿的气力提升特性

李 炜

(北京有色冶金设计研究总院)

## 摘 要

在试验的基础上,对气力提升特性进行了研究。试验表明,气力提升特性与提升管内三相流的流型紧密相关。只有当供气量足以使三相流的流型保持团状流,且 Taylor 泡充分发展的条件下,才能达到最大的提升量和最高的提升效率。还着重对气力提升的最佳工况进行了探讨,得出了不同运行条件下的一般规律,并建立了综合效率参数与空气表观体积率的经验关系。

**关键词:** 大洋采矿 气力提升 特性 最佳工况

气力提升是近二十年来世界各国研究较多的开采大洋多金属结核的扬矿方法<sup>[1~12]</sup>。为了突破我国在大洋采矿试验研究方面尚未起步的局面,1990年6月,我们建成了一套小型提升试验系统,并开展了浮子提升和气力提升试验。本文拟根据其部分试验资料对气力提升特性及其最佳工况进行初步介绍和探讨。

## 1 试验与分析

### 1.1 试验设备及方法

试验系统见图1,其提升管直径52.85 mm,提升高度350.4 cm,进气口中心到提升管出口的距离为232.9 cm,进气口中心到地面的距离为117.5 cm。

试验用的固体相物料为煤粒,其密度为 $\rho_s = 1365 \text{ kg/m}^3$ ,颗粒基本均匀,平均粒径 $d_s = 4 \text{ mm}$ 。

试验中通过转子流量计测量气体流量,利用测流箱和计时器测定液相和固相流量,利用压力表测量压力,固相体积浓度采用重量法测

定。

### 1.2 流型验证

本试验事实上属于气-液-固三相流管道提升,但是,考虑到对三相流的流型研究尚少,而且气相速度不高,不可能输送固体颗粒,后者只是悬浮于液相之中,并随之流动。所以,可将其流型近似视为气-液两相流的流型。

研究表明,对于任一给定的流体体系,确定流型的主要因素是各相流速<sup>[13~15]</sup>,而不是管径、密度、粘度和界面张力等可以忽略的因素。Golán<sup>[16]</sup>认为判别气泡流到团状流的分界方程为

$$u_{ao}^* = 0.0061 + 0.007 u_{lo} \quad (1)$$

判别团状流到泡沫流的分界方程为

$$u_{ao}^* = 0.136 + 0.007 u_{lo} \quad (2)$$

$$\text{其中 } u_{ao}^* = u_a / \sqrt{gD(r_1/r_a)} \quad (3)$$

$$u_{lo}^* = u_l \sqrt{gD} \quad (4)$$

式中 $u_a$ 为气相表观速度; $u_l$ 为液相表观速度。我们的流型验证试验结果(图2)则表明除个别组次之外,绝大多数组次的流型皆为团状

流。在团状流条件下，气泡由帽形泡发展为子弹形的气泡，这种气泡一般称 Taylor 泡。

必须指出，大洋采矿的实际提升管总长将大于 5 000 m，其中三相流段至少也在 2 000 m 左右。对于这样的垂直长管线，压力和空气在液相中的溶解度将沿深度发生较大变化，有可能影响三相流的流型。目前，只作团状流处理，暂不考虑沿程的流型变化。

加，Taylor 长度迅速增加，因而提升水量也急剧增大；但是，当供气量增加到一定程度后，Taylor 泡的长度已接近于极限，而液团中的小气泡数量急剧增加，此时气泡在管中所占的体积已变得重要了，故扬水量只略有增加。但当  $Q_a < 24 \sim 28 \text{ m}^3/\text{h}$  时，气相表观速度  $u_a = 3.04 \sim 3.55 \text{ m/s}$ ，液相表观速度  $u_l = 0.37 \text{ m/s}$ ，实际上流型开始转变为泡沫流，故提升水量开始减小。

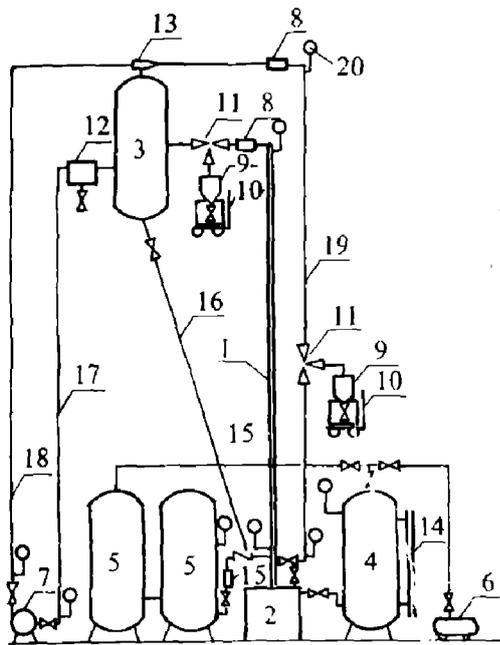


图1 试验系统示意图

1—提升管；2—结核箱；3—分离仓；4—补水箱；5—空气恒压箱；6—空压机；7—水泵；8—电磁流量计；9—测流箱；10—磅秤；11—三通旋塞；12—沉淀箱；13—喷射箱；14—液位计；15—转子气体流量计；16—回矿管；17—进水管；18—出水管；19—浮子管；20—压力表

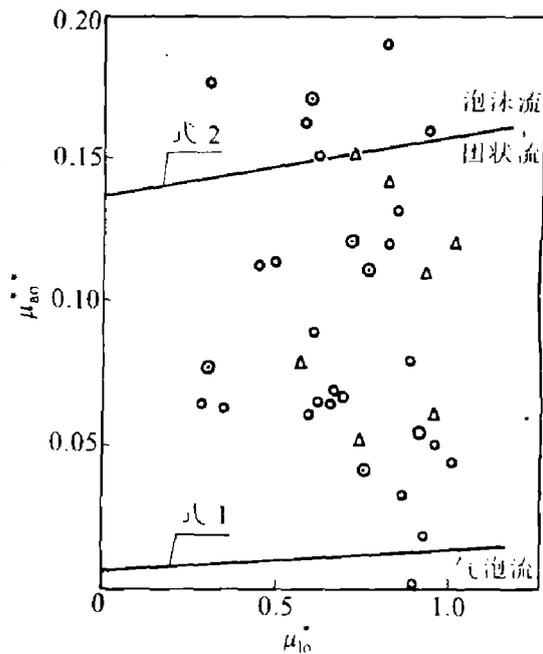


图2 气体的修正佛汝德数与液体佛汝德数的关系

### 1.3 扬水特性

#### 1.3.1 扬水量与供气量的关系

图 3 为试验的扬水量  $Q_l$  与供气量  $Q_a$  的关系。由图 3 可见，曲线可分为三个区段： $Q_a < 10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$  时，随供气量增加，曲线近似于直线上升； $12 < Q_a < 24 \sim 28 \text{ m}^3/\text{h}$  时，供气量增大却导致扬水量逐渐减小。根据表 1 和图 2，当  $Q_a < 24 \sim 28 \text{ m}^3/\text{h}$  时，其流型属于团状流范围。开始供气量很小，形成的 Taylor 泡也小，故扬水量小；随着供气量增

#### 1.3.2 能量关系

在绝热过程中，压缩空气所需要的能量，即输入能量可表示为：

$$E_a = P_a \cdot Q_a(S_2) \cdot \ln[P(S_2)/P_a] \quad (5)$$

扬水所需的能量，即有效能量表达式为

$$E_l = \gamma_l \cdot Q_l(L-H_s) \quad (6)$$

提升有效能量与输入能量的关系示于图 4。可以看出，开始，随着输入能量的增加，有效能量也增加；当输入能量增大到 9~11 W 后，有效能量逐渐减小。当输入能量为 8~10 W 时，扬水有效能量最大。原因是：一开始，输入的能量小是由于输入的气量小，有效能量也小，随着输入能量的增加，气泡的长度增大，这样提升的流量也增大，故有效能量也

相应增大; 当输入能量大于 9~11 W 时, 随着输入能量的增加, 气泡所占的体积增大, 提升量降低, 故有效能量减小。试验表明, 有效能量最大值范围与提升水量最大值范围相对应的供气量一致。

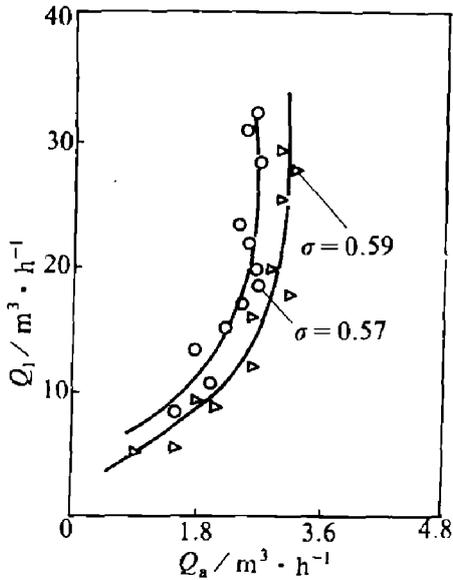


图3 扬水量与供气量关系

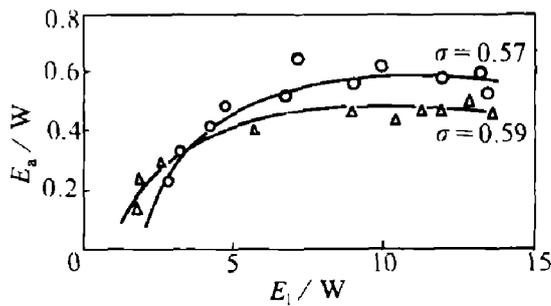


图4 扬水有效能量与输入能量关系

1.3.3 扬水效率

扬水效率可表示为

$$\eta_1 = E_1 / E_a = \gamma_1 \cdot Q_1 \cdot (L - H_c) / \{P_a \cdot Q_a(S_2) \cdot \ln[P(S_2) / P_a]\} \quad (7)$$

图5为扬水效率与供气量关系。提升效率最大值是在供气量为 10~12 m³/h 之间。由(7)式可知, 开始供气量由小到大增大时, 提升水量也增大, 因而提升效率增大; 当供气量大于 10~12 m³/h 时, 提升水量反而减小, 故扬水效率降低。

上述分析表明, 气升泵的最佳工况与提升

管内气液两相流的流型紧密相关。而对于气升泵, 液相表观上升速度虽与供气量有关, 但变化幅度不大, 一般为 0.1~0.3 m/s 左右。因此, 关键是气相表观速度的影响。(气相表观速度定义见后(12)式)。只有当气相表观速度达到某值, 提升管内 Taylor 泡充分发展, 而液团中小气泡相对较少时, 气升泵工况才最佳。就是说, 气升泵存在一个最佳气相表观速度。根据本试验条件, 并参考 Govier 等人的试验成果, 这个最佳气相表观速度大约为 1.10~1.5 m/s 左右。

1.4 提升固体颗粒特性

1.4.1 提升量与供气量的关系

如图6示, 气流量 Q 达 10~12 m³/h 以前, 被提升的固体颗粒质量 Ma 随 Q 的增加而增加, 此后则反而减少。因为对于三相流, 固体颗粒只是悬浮于液相之中, 并随之输送。气量小时, Taylor 泡短, 提升的水量和固体颗粒量也少; 气量大时, 气泡体积增加, 水量减小, 固相的提升量也降低。

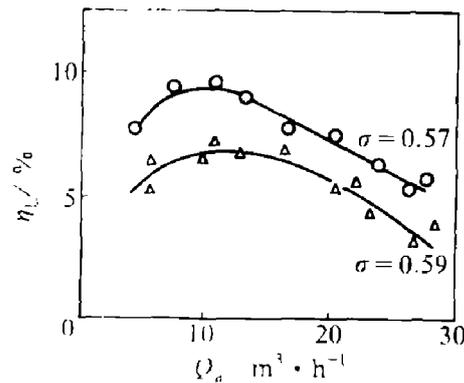


图5 扬水效率曲线

1.4.2 提升效率

图7为固体颗粒提升效率与供气量的关系, 由图可见, 总趋势与扬水效率曲线(图5)基本一致, 而且最高效率点所对应的供气量范围也基本相同, 即 Qa = 10~12 m³/h。但与扬水效率曲线比较, 固体颗粒提升效率曲线也略有不同, 就是当 Qa < 10~12 m³/h 时, 曲线上升更为迅速, 而且当 Qa < 10~12 m³/h 时, 曲线下降也更为急剧; 因此, 较之扬水效

率曲线显得更加尖瘦。其原因与固体颗粒质量流量曲线(图6)相同,不再赘述。

提升总效率曲线示于图8,原因如前所述。

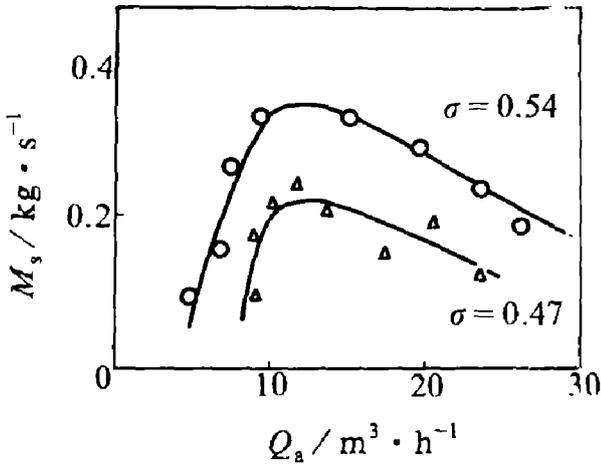


图6 固体颗粒质量流量与供气量关系

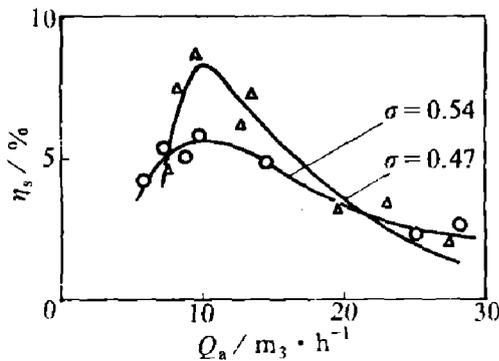


图7 固体颗粒提升效率与供气量关系

### 1.5 浸水率的影响

浸水率定义为

$$\sigma = H_s / (L + L_s) \quad (8)$$

由图6可以看出,浸水率对气力提升特性影响显著。浸水率愈小,即进气口位置愈高,提升固相和液相的“吸程” $L_s$ 愈大,故在同一供气量条件下,较之浸水率大者其提升量为小。也正由于其“吸程”大,故在同一供气量条件下,较之浸水率大者提升固相和液相所做的功(有效能量)大,效率也高,道理是显然的。

至于图4中当 $E_a < 3 \text{ W}$ 时,浸水率小者,其有效能量反而低于浸水率大者。这是因为提升有效能量主要与“吸程”和提升量有关。

当供气量较小时,随着 $Q_a$ 增加,浸水率大者提升量增加较快(见图3),此时提升量起主要作用,故有效能量较之浸水率小者为大。但当供气量继续增加时,提升量上升缓慢。此时“吸程”则起主要作用,故当 $E_a > 3 \text{ W}$ 时,浸水率小者,其有效能量较之浸水率大者为大。

### 1.6 气力提升的最佳工作条件

图9是根据三种不同管径的试验资料点绘的提升固体效率与气相佛汝德数的关系。气相佛汝德数定义为

$$F_{ra} = u_a / \sqrt{gD} \quad (9)$$

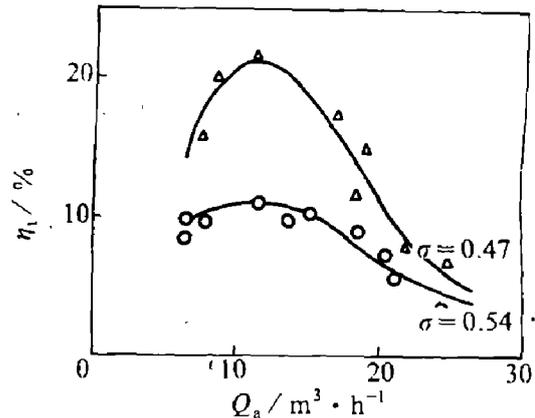


图8 提升效率曲线

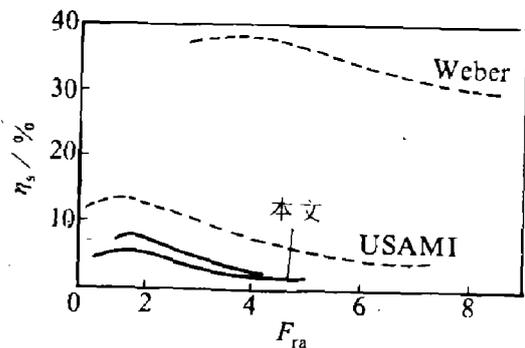


图9 提升固体效率与气相佛汝德关系

由图可见,宇佐美毅<sup>[18]</sup>等人的试验管径最小, $D=46.7 \text{ m}$ ,最高效率相应的 $F_{ra}=1.4$ 本试验管径稍大,最高效率相应的 $F_{ra}=1.8 \sim 1.9$ ,而Weber<sup>[10]</sup>等人的试验管径较大, $D=300 \text{ mm}$ ,其相应于最高效率的 $F_{ra}=3.3$ 左右。说明提升固相最高效率所对应的气相佛汝德数是随管径增大而增大。

提升效率是衡量气力提升效果的主要指标。上述分析表明, 无论是提升液相还是提升固相, 其提升效率与供气量的关系都不是单调函数关系, 提升效率曲线都出现极大值。就是说, 气力提升有一个最佳工况, 为了探索气力提升最佳工作条件的一般规律, 本文根据部分试验资料做了一点尝试。图 10 为根据本试验和 Weber 的部分试验资料点绘的固相筛升的综合效率参数  $N$  与气相表观体积率  $E$  的关系。图中所用资料的试验条件列于表 2。

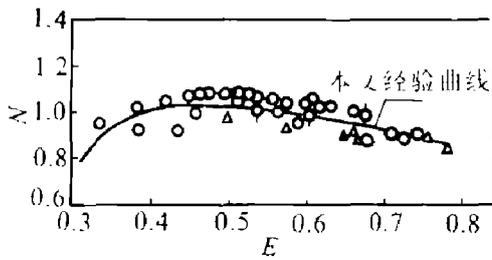


图 10 提升固体的综合效率参数与气相表观体积率的关系

固相提升的综合效率参数  $N$  定义为:

$$N = (\eta_s / C_v)^{0.05} \cdot \sigma^{0.1} \quad (10)$$

气相表观体积率  $E$  定义为

$$E = u_a / u_{a1} \quad (11)$$

式中  $u_a$  为空气表观速度,  $u_{a1}$  为气泡上升速度。

空气表观速度由下式确定:

$$u_a = Q_a(S_2) / A \quad (12)$$

对于恒定的气-液两相流, Nicklin<sup>[19]</sup> 得出气泡上升速度表达式为

$$u_{a1} = 1.2[(Q_a + Q_l) / A] + 0.35\sqrt{gD} \quad (13)$$

对于固-气-液三相流宇佐美毅<sup>[20]</sup> 给出气泡上升速度表达式为

$$u_{a1} = 1.2(Q_a + Q_l + Q_s) / A + 0.35\sqrt{gD} \quad (14)$$

由表 2 和图 10 可以看出, 尽管各组试验条件差别较大, 但图中点群却较为集中, 说明其规律基本一致。由此得出如下经验关系:

$$N = 5.92e^{-11.13(E-0.348)} \times (E-0.348)+0.835 \quad (15)$$

式(18)的极值点则为气力提升的最佳工作条件, 即

$$E = 0.437; N = 1.03$$

表 2 试验条件

序号	符号	$\rho_a / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$h_2 / \text{mm}$	$D / \text{mm}$	$Q_n / \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$Q_s / \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$Q_l / \text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$C_v / \%$	$(L+L_s) / \text{m}$	$\sigma$	备注
1	2575	5	300	673.2	7.27	576	1.13	279	0.613		
				~	~	~	~	~	~		
				1458	34.31	835.2	4.06	332.9	0.673		
2	2575	5	300	838.8	19.2	694.8	2.69	55.4	0.758		
				~	~	~	~	~	~		
				2027	45.72	918	4.74				
3	2610	0.6	300	1404	43.74	597.6	6.4	61.3	0.783		
				~	~	~	~	~	~		
				1641.6	45.79	640	7.1				
4	2610	0.6	300	792	18.61	554.4	3.25	157.4	0.305		Weber
				~	~	~	~	~	~		
				1756.8	40.61	634.7	6.01				
5	1143	50	300	1483	41.8	835	4.8	451	0.228		
				~	~	~	~	~	~		
				2567	72.4	947	7.5				
6	1143	50	300	1397	45.7	932	4.7	449.4	0.545		
				~	~	~	~	~	~		
				1818	56.5	1080	5.4				
7	1365	4	52.85	5.2	0.40	5.69	7.62	3.504	0.54		
				~	~	~	~	~	~		
				30	0.70	3.47	11.70				
8	1365	4	52.85	8.1	0.34	3.47	6.75				本试验
				~	~	~	~	~	~		
				22.5	0.52	6.04	9.32				

## 2 结语

(1) 三相流的流型主要由各相的流速确定。团状流条件下, Taylor 泡的数量、长度是影响提升效率的主要因素; 浸水度也有较大的影响;

(2) 试验表明在不同运行条件下, 提升水量、提升固体量和提升效率与供气量的关系都不是单调函数关系, 都出现极大值点, 这意味着气力提升有一个最佳工作条件。本文所得出的气力提升最佳工作条件的一般规律及所建立的综合效率参数  $N$  和空气表观体积度  $E$  的经验关系, 只是根据现有的试验资料进行的初步探讨, 是否普遍适用, 尚待今后大量试验证实, 初步分析表明, 气力提升最佳工作条件有  $E=0.437$ ,  $N=1.03$ 。

### 参考文献

- 1 Loscher C J. Invention of an aerostatic pumping system Crusius: Leipzig, 1797.
- 2 Gejer V G, Kostanda W S. Hydraulic conveying of coal slurry by aid of air-lift pumps and coal suction pressure plants. Механи~ ЗаЩИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОЛСТВа, 1959: 9.
- 3 Parsons J S. Dissertation, University of California, 1965.
- 4 Marine Mining, 1981, 3 (1) / (2).
- 5 Kaufman R *et al.* The design and operation of a Pacific Ocean deep-ocean mining. OTC 4901, 1985, 33-51.
- 6 Clauss G. *fordern und heben*, 1972, 22 (6): 795-804.
- 7 Weber F L. *Machines, reciprocating pumps and reciprocating compressors*. Berlin: VEB Verlag Technik, 1970.
- 8 Dedegil M Y. *fordern und heben*, 1974, 24 (10): 1355-1359.
- 9 Boes, C, Durin R, Wasseroth E. *fordern und heben*, 1972, 22 (4): 367-378.
- 10 Weber M, Dedegil Y. THYDROTRANSPORT4 P. H1-1-H1-23, 18th-21st May, 1976.
- 11 宇佐美毅, 齐藤隆之. 采矿与保安, 1980, 26 (7): 356-368.
- 12 山崎哲生等. 采矿与保安, 1987, 33 (4): 169-177.
- 13 Duns H Jr., Ros N C L. Sixth World Petroleum Congress, Section 2, Franhhfurt, 1963. 22.
- 14 Govier G W, Sullivan G A, Wood R K. *Can J Chem Eng*, 1961, 39: 67.
- 15 Brown R A S, Sullivan G A, Govier G W. *Can J Chem Eng*, 1960, 38: 62.
- 16 Govier G W, Radford B A, Dunn I S C. *Can J Chem Eng*, 1957, 35: 58.
- 17 齐藤隆之, 宇佐美毅. 采矿与保安, 1982, 26 (6): 297-309.
- 18 Nichlin D L. Ph. D. Thesis, University of Cambridge, 1961.
- 19 宇佐美毅, 齐藤隆之. 采矿与保安, 1980, 26 (6): 298-309.