

# 喷射式浮选机充气搅拌单元结构参数研究

段旭琴<sup>1,2</sup> 宋 猛<sup>1,2</sup> 程 鹏<sup>1,2</sup> 熊建辉<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 为了探讨充气搅拌单元结构参数对喷射式浮选机充气性能的影响规律, 对最大给料量为  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  的浮选机充气搅拌单元进行设计和研究。研究表明: 矿浆分配器与空气反应器的喷浆面积比  $K$ 、空气反应器和矿浆分配器的喷嘴参数是决定喷射式浮选机充气性能的关键因素; 给料压力和喷浆角度在一定程度上影响充气效果。空气反应器喷嘴最佳参数为  $10 \times \phi 2.0 \text{ mm}$ , 面积比  $K$  为  $7 \sim 8$ , 喷射角  $12.5^\circ$  时, 喷射式浮选机充气均匀稳定、吸气量充足; 矿浆分配器喷嘴的最佳参数为  $18 \times \phi 4 \text{ mm}$ , 给料压力为  $0.22 \text{ MPa}$  时, 充气量达到  $1.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ , 充气均匀系数  $94.31\%$ , 充气混合系数  $1.20$ , 喷射式浮选机充气性能优良。

**关键词:** 喷射式浮选机; 充气搅拌单元; 空气反应器; 充气性能

**中图分类号:** TD94 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2014)10-0117-04

## Experimental Study on Structure Parameters for Aeration - Agitation Unit of Jet Flotation Machine

DUAN Xu-qin<sup>1,2</sup> SONG Meng<sup>1,2</sup> CHENG Peng<sup>1,2</sup> XIONG Jian-hui<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. The State Key Laboratory of High - Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to investigate the influence of aeration - agitation unit's structure parameters on aeration performance of jet flotation machine, a sample unit with  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  pulp throughput was designed and studied. The nozzles of the aerator and distributor were roundness and arranged annularly. Results showed that the ratio  $K$  of distributor's spouting area and that of aerator, distributor and aerator nozzle's diameter and number were the main factors which influence the aeration performance, the feeding pressure and aerator spouting angle affected aeration to a certain degree. The optimum size of aerator nozzles was  $10 \times \phi 2.0 \text{ mm}$ , when ratio  $K$  changed from 7 to 8, at  $12.5^\circ$  spouting slope degree, the unit could aerate uniformly and steady, with enough aeration quantity. The optimal parameter of distributor nozzle was  $18 \times \phi 4 \text{ mm}$ , under  $0.22 \text{ MPa}$  feeding pressure, the aeration capacity could reach to  $1.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ , aeration uniformity coefficient was  $94.31\%$  and aeration hybrid coefficient was  $1.20$ , jet aeration machine performance was very well.

**Key words:** jet flotation machine; aeration - agitation unit; aerator; aeration performance

## 0 引 言

泡沫浮选是应用于细粒煤分选的最广泛方法, 全球每年大约有 1.42 亿 t 的细粒精煤由浮选作业产生<sup>[1-2]</sup>。采煤机械化程度的提高和资源地质条件的恶化, 浮选作业处理量日益增加, 入浮煤泥性质更加复杂, 这对浮选作业提出了更高的要求。大型、高效浮选机的开发与利用成为解决问题的关键, 喷射

式浮选机作为一种处理量大、选择性好、药剂用量少、电耗低、结构简单的高效浮选设备受到选煤工作者的普遍关注<sup>[3]</sup>。代表性的设备有国产的 FJC 系列浮选机, 国外的 Jameson 浮选机<sup>[4]</sup>和普浮乐浮选机<sup>[5]</sup>。FJC 浮选机在使用中表现出充气强度和充气均匀度高、精煤灰分较低的优点<sup>[6-7]</sup>, 但系统复杂、喷嘴容易堵塞<sup>[8]</sup>。Jameson 浮选机的优势在于分选粒度范围宽、运行和保养成本低、自动化程度高<sup>[9]</sup>,

收稿日期: 2014-04-14; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.10.028

作者简介: 段旭琴(1971—), 女, 山西长治人, 副教授, 博士。Tel: 010-62311486, E-mail: dxq918@ustb.edu.cn

引用格式: 段旭琴, 宋 猛, 程 鹏, 等. 喷射式浮选机充气搅拌单元结构参数研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(10): 117-120.

DUAN Xu-qin, SONG Meng, CHENG Peng, et al. Experimental Study on Structure Parameters for Aeration - Agitation Unit of Jet Flotation Machine[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(10): 117-120.

但存在充气量不足、尾矿需重复再选等缺点<sup>[10]</sup>。普浮乐浮选机<sup>[5]</sup>的浮选速度快、处理量大、自动化程度高,处理易选煤时优势突出。但分选难选煤时,效果不太理想。与国产浮选设备相比,进口设备价格普遍较高<sup>[11]</sup>,因此开发具有自主知识产权、结构简单、性能优良的大型喷射式浮选机势在必行。笔者结合各类型浮选机的结构特点,对射流式浮选机的充气搅拌单元进行设计和研究,探讨充气搅拌单元主要结构参数对喷射式浮选机充气性能的影响规律,以期对相关设计人员提供参考。

## 1 充气搅拌单元设计

喷射式浮选机是基于射流原理,将矿浆泵的压力能转换为动能的同时,在管内形成负压,实现吸气并产生气泡,同时进行煤粒矿化<sup>[12-15]</sup>。充气搅拌单元是射流式浮选机的核心部件,其工作性能是决定浮选机工艺效果的关键因素<sup>[16]</sup>。实验室设计的充气搅拌单元结构如图 1 所示,该单元主要由空气反应器和矿浆分配器组成,中间由下冲管连接。

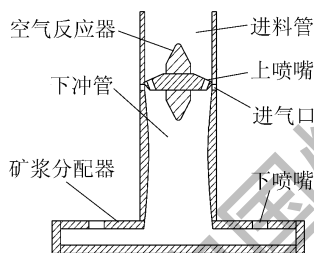


图 1 充气搅拌单元结构示意图

与浮选药剂混合好的矿浆由渣浆泵以一定的压力压入浮选槽上方的进料管,经空气反应器喷嘴(上喷嘴)作用后,压力能转化为动能,产生高速矿浆射流,在上喷嘴出口处形成低压,卷吸空气,形成气流,气流速度在高速矿浆流的带动下快速增加。三相流体在下冲管上部混合,进行快速能力交换,矿浆的动能逐步转化为势能进一步压缩气体,增大了空气在矿浆中的溶解度。在下冲管下部,空气弥散为微小的气泡并实现管流矿化。矿化后的气泡通过分配盘上环状布置的喷嘴(下喷嘴)喷射到浮选槽内。携带有疏水颗粒的气泡上升至浮选槽顶端溢流成为产品,亲水颗粒留在槽中,由尾矿管排出。物料在浮选机内的流动是先垂直向下再垂直向上的运动,充气、搅拌、矿化均在充气搅拌单元中完成。

1) 空气反应器参数设计。空气反应器采用圆形多喷嘴结构,与单喷嘴射流不同,多喷嘴的出口射

流由多股工作流体组成,在同样的射流面积下,增大了射流矿浆与吸入空气的接触面积,从而加快了能量交换,使空气在短时间内弥散为小气泡,对提高矿化概率有利<sup>[17]</sup>。喷嘴在竖直方向倾斜布置,以最大限度地降低附壁效应造成的影响<sup>[18]</sup>。喷嘴轴线与竖直方向的夹角定义为喷射方向角 $\alpha$ ,水平方向采用周向排列。

矿浆属于不可压缩流体,喷射式浮选机内矿浆的流动适用伯努利方程。喷射式浮选机设计最大给矿量为  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ ,进料管直径设计为  $0.02 \text{ m}$ ,矿浆密度取  $1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,根据伯努利方程,经计算,充气单元要实现自吸气,空气反应器喷浆口面积  $S_A$  应小于  $3.32 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。喷嘴面积取极大值,采用圆形多喷嘴设计时,喷嘴数量分别为 4、6、8、10、12、14 个时,喷嘴孔径分别为 3.11、2.54、2.20、1.97、1.80、1.66 mm。经试验发现,喷嘴数量取 4 或 6 个,处理量一定时,由于喷浆口面积大,矿浆通过喷嘴的速度相对较小,吸气口处的真空度不足,充气量低;喷嘴数量增大到 14 个时,孔径过小,生产中容易造成堵塞,且此时均匀布置喷嘴比较困难。最终确定了  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  三组空气反应器喷嘴组合,  $A_1$  为  $8 \times \phi 2.2 \text{ mm}$ ,  $A_2$  为  $10 \times \phi 2.0 \text{ mm}$ ,  $A_3$  为  $12 \times \phi 1.8 \text{ mm}$ 。

2) 矿浆分配器参数设计。为提高矿化气泡在槽体的扩散速度,并保证矿化气泡在槽体中均匀分散,矿浆分配器采用多喷嘴设计,竖直安装,喷嘴长 5 mm(图 2)。参照已有研究成果<sup>[17]</sup>和相关试验,设计中,先确定矿浆分配器与空气反应器喷浆面积比,即下喷嘴面积与上喷嘴面积之比  $K$ ,再确定分配器孔数和孔径。设计中  $K$  为 4.5~8.5,矿浆分配器喷嘴相应直径分别为 3、4、5、6 mm。



图 2 矿浆分配器喷嘴分布位置示意

## 2 试验结果与讨论

根据 MT/T 652—1997《煤矿用带式输送机安全规范》规定,充气性能试验在清水中进行,以充气量、充气均匀系数和充气混合系数作为评价指标。

### 2.1 空气反应器喷嘴参数对充气量的影响

下喷嘴尺寸固定为  $18 \times \phi 4 \text{ mm}$ ,空气反应器喷

浆口面积  $S_A$  保持不变, 空气反应器喷嘴数量及直径改变 3 个系列空气反应器喷嘴组合在不同给料压力下的喷射式浮选机充气量试验结果如图 3 所示, 充气均匀系数和充气混合系数见表 1。

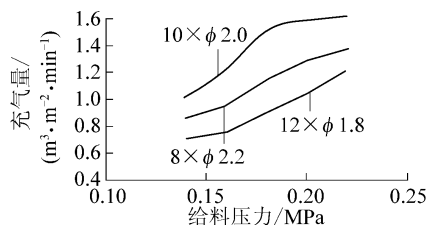


图3 不同给料压力下空气反应器喷嘴结构与充气量关系

表1  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  三种空气反应器喷嘴组合的浮选机充气均匀系数和混合系数

给料压力/MPa	充气均匀系数/%			混合系数		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
0.14	71.58	75.85	71.32	0.78	0.91	0.82
0.16	73.82	79.67	74.24	0.82	1.04	0.89
0.18	81.05	83.41	82.65	0.94	1.18	0.96
0.20	82.34	87.62	83.51	1.00	1.18	0.97
0.22	85.79	94.31	86.74	1.04	1.20	1.03

试验结果证实, 相同面积比和给料压力下  $A_2$  空气反应器喷嘴组合的浮选机充气量最大, 充气均匀性和充气混合系数最优, 且压力为 0.22 MPa 时, 充气效果最佳, 继续增大压力对充气量的增加影响很小。可以认为,  $A_2$  空气反应器结构比较合理。

## 2.2 空气反应器喷嘴喷射角度对充气量的影响

吸气管负压是影响浮选机充气量大小的主要因素之一<sup>[19]</sup>, 而空气反应器喷射方向角大小与吸气管负压密切相关。给料压力为 0.22 MPa, 空气反应器喷嘴尺寸为  $10 \times \phi 2.0$  mm,  $\alpha$  不同时, 试验测得进气

口处的真空度、充气量及充气均匀系数见表 2。

表2 空气反应器喷嘴喷射方向角  $\alpha$  对充气指标的影响

$\alpha / (^\circ)$	真空度/MPa	充气量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ )	充气混合系数	充气均匀系数/%
5.0	0.01	1.220	0.96	83.16
7.5	0.02	1.292	1.12	89.24
10.0	0.03	1.359	1.15	90.58
12.5	0.04	1.452	1.20	94.31
15.0	0.04	1.417	1.08	93.21

由表 2 可知, 喷浆压力及充气单元其他参数一定时, 喷射方向角小则吸气管负压低, 从喷嘴喷出的高速矿浆流与气体接触面积小, 能与液体接触并融入液流的气体也相对减少, 造成充气量和充气均匀程度较低。随喷射角增加, 真空度增大, 充气量及充气均匀系数逐渐增加, 当喷射方向角增大到  $12.5^\circ$  时, 充气搅拌单元内的真空度达到最大, 为 0.04 MPa, 喷射方向角继续增大至  $15^\circ$  时, 真空度保持不变, 但充气量和充气均匀系数降低。这是因为喷射方向角达到一定值后, 多喷嘴的各股射流相聚碰撞后动量变化量不大, 各股射流运动方向基本不变, 射流喷到管壁上, 附壁效应对充气量的影响严重, 空气反应器吸气量急剧降低。空气反应器喷嘴的安装角为  $12.5^\circ$  时, 液体与空气的接触面积最大, 各射流汇聚时水平速度相互抵消, 最大限度地降低了附壁对充气量的影响, 充气量达到最大, 充气均匀度最好。

## 2.3 上下喷嘴面积比对充气量的影响

下喷嘴面积与上喷嘴面积比值  $K$  对浮选机吸气量有显著的影响, 在不同  $K$  值条件下进行试验, 结果如图 4 所示。

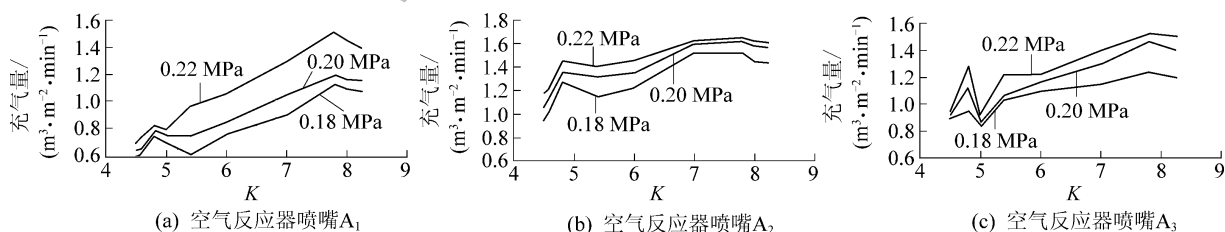


图4 下喷嘴面积与上喷嘴面积比值  $K$  对浮选机充气量的影响

试验结果表明, 空气反应器喷浆面积一定时,  $K$  对喷射式浮选机充气效果影响显著。当  $K < 5.5$  时, 随  $K$  值变化 3 种上喷嘴组合的充气量均出现较大波动, 充气不稳定;  $K > 5.5$  时, 随  $K$  值增加, 浮选机充气量规律性上升。在试验的 3 个压力范围内, 浮选机的充气量均很稳定。总的来看, 上喷嘴为  $10 \times \phi 2.0$  mm、 $K = 7 \sim 8$  时, 浮选机充气量明显高于其

他条件下的结果, 最高达  $1.65 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$ , 且此时充气量受压力的影响最小, 充气均匀、稳定。

## 2.4 分配盘喷嘴孔径对充气量的影响

$K$  固定为 7, 上喷嘴设定为  $10 \times \phi 2.0$  mm, 下喷嘴孔径分别为 3、4、5、6 mm 时的充气量测试结果如图 5 所示。浮选机的充气均匀系数和充气混合系数计算结果见表 3 和表 4。

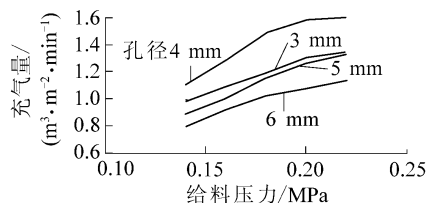


图5 分配盘喷嘴参数变化时的浮选机充气量

表3 分配盘喷嘴参数变化时的浮选机充气均匀系数 %

孔径/ mm	不同给料压力下的浮选机充气均匀系数				
	0.14 MPa	0.16 MPa	0.18 MPa	0.20 MPa	0.22 MPa
3	76.28	80.30	82.19	86.59	90.45
4	75.85	79.67	83.41	87.62	94.31
5	66.60	69.52	78.76	82.31	85.15
6	65.41	66.89	70.90	72.31	75.45

表4 分配盘喷嘴参数变化时的浮选机充气混合系数

孔径/ mm	不同给料压力下的浮选机充气混合系数				
	0.14 MPa	0.16 MPa	0.18 MPa	0.20 MPa	0.22 MPa
3	0.77	0.82	0.89	0.98	1.01
4	0.91	1.04	1.18	1.18	1.20
5	0.69	0.75	0.87	0.95	1.00
6	0.62	0.69	0.76	0.81	0.85

结果显示  $K$  不变时,随矿浆分配器喷嘴的孔径增加和数量减小,浮选机的充气均匀系数逐渐降低。矿浆分配器喷嘴参数对充气量及充气混合系数的影响比对充气均匀系数的影响程度更明显。喷嘴孔径 4 mm 时,充气量、充气混合系数要优于喷嘴孔径为 3、5、6 mm 的矿浆分配器;当压力 0.22 MPa,上喷嘴为  $10 \times \phi 2$  mm 时,下喷嘴孔径为 4 mm 的矿浆分配器充气量最大,从试验中也观察到,此时浮选槽中气泡的大小和运动速度明显优于其他几组,因此,矿浆分配器的喷嘴最佳孔径为 4 mm,数量为 18 个。

### 3 结 论

1) 喷射式浮选机的空气反应器喷浆面积一定时,矿浆分配器与空气反应器面积比  $K$ 、空气反应器和矿浆分配器几何参数对浮选机充气效果的影响显著。 $K=7 \sim 8$  时,浮选机充气均匀、稳定;空气反应器参数为  $10 \times \phi 2$  mm,矿浆分配器喷嘴参数选择  $18 \times \phi 4$  mm 时,浮选机充气量最大达  $1.65 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ,充气均匀系数 94.31%、混合系数 1.20,充气性能大幅优于浮选机设计标准。

2) 嘴喷射角度主要通过影响空气反应器进口处真空度的大小影响浮选机的充气性能。试验确

定的空气反应器喷嘴喷射方向角为  $12.5^\circ$ ,此时,空气入口处的最大负压为 0.04 MPa。

3) 喷射式浮选机充气效果除与其结构参数有关,还与给料压力有关,当结构参数设计合理时,可在相对较低的给矿压力下,得到较佳的充气效果。

#### 参考文献:

- [1] Hasan Hacifazlioglu, Ihsan Toroglu. Optimization of Design and Operating Parameters in a Pilot scale Jameson Cell for Slime Coal Cleaning[J]. Fuel Processing Technology, 2007, 88: 731-736.
- [2] Hüseyin Vapur Oktay Bayat, Metin Uçrumb/Coal Flotation Optimization Using Modified Flotation Parameters and Combustible Recovery in a JAMESON Cell[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51: 1891-1897.
- [3] 牟联胜. 采用高效射流浮选机从某尾矿中回收硫的工业试验[J]. 矿产综合利用, 2010(3): 46-48.
- [4] 杜淑华. 铜尾矿有价元素资源化应用基础研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [5] 韩伟, 李仁年, 杨瑞, 等. 基于内流场分析的机械搅拌式浮选机改型设计[J]. 机械工程学, 2009, 45(12): 84-88.
- [6] 曹华, 陈禹蒙, 刘建华, 等. FJC-A 喷射式浮选机在城郊选煤厂的应用[J]. 煤质技术, 2012(7): 48-53.
- [7] 程宏志. 我国选煤技术现状与发展趋势[J]. 选煤技术, 2012(4): 11-15.
- [8] 陈飞, 洪美玲. 我国煤用浮选机的应用现状与发展趋势[J]. 煤炭加工与综合利用, 2011(6): 31-34.
- [9] 倪超, 谢广元, 蒋兆桂, 等. 煤泥“2+2”分选工艺的问题分析及优化试验[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 2036-2041.
- [10] 刘惠林, 杨保东, 向阳春, 等. 浮选柱的研究应用及发展趋势[J]. 有色金属, 2012(8): 202-207.
- [11] 李俊, 杜淑坤, 吴静, 等. 对 KHD(K-FV35VS) 型浮选机使用情况的分析[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(6): 17-21.
- [12] 任怀良. 难浮细粒煤浮选技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(5): 26-29.
- [13] CHEN Wen-yi, WANG Jing-bo, JIANG Nan et al. Numerical Simulation of Gas-Liquid Two-Phase Jet Flow in Air-Bubble Generator[J]. Journal Central South University of Technology, 2008, 15(S0): 140-144.
- [14] 李国胜, 刘炯天, 邓丽君, 等. 管流矿化在新型浮选柱设计中的应用[J]. 金属矿山, 2009(9): 128-131.
- [15] 江明东, 王微微, 闫锐敏, 等. 喷射式浮选机浸没式充气搅拌装置结构参数的试验[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(1): 18-21.
- [16] 郝春建, 徐世辉. 两种浮选机在城郊选煤厂的使用对比研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(10): 32-36.
- [17] 周伟. FJC(A) 充气搅拌装置流体动力学及试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- [18] 段新胜. 环形射流泵射流附壁效应与自吸性能的实验研究[J]. 西部探矿工程, 1999(5): 65-69.
- [19] 杨润全, 王怀法. 宽粒级煤泥浮选机流体动力学模拟与试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 120-124, 128.