

文章编号:0253-9993(2013)08-1443-05

煤泥柱浮选的承载能力与气含率轴向分布

廖寅飞,刘炯天,李树磊

(中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116)

摘要:为优化柱浮选设备的处理能力和分选效果,采用压差法测定柱体内部的气含率,同时通过调整入料浓度和流速,分析煤泥柱浮选承载能力和气含率轴向分布的变化规律,并探索两者之间的内在联系及对煤泥分选效果的影响。结果表明:入料流速小于临界流速时,气含率在轴向上从底部到顶部依次增大;流速达到临界流速或以上时,气含率轴向分布发生逆变;临界流速随入料浓度的升高逐渐减小。承载能力随入料流速的增大先增大后减小,拐点为气含率轴向分布逆变的临界流速;一定范围内浓度的升高有利于提高承载能力和可燃体回收率。建立了煤泥柱浮选的承载能力预测模型,线性拟合的相关系数 $R^2=0.873$,达到了较高的预测精度。

关键词:柱浮选;承载能力;气含率;轴向分布

中图分类号:TD923 **文献标志码:**A

Carrying capacity and axial distribution of gas holdup in coal column flotation

LIAO Yin-fei, LIU Jiong-tian, LI Shu-lei

(School of Chemical Engineering & Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to optimize the capacity and separation performance of column flotation equipment, pressure difference method was used to monitor gas holdup in flotation column. By adjusting the feed rate and feed concentration, the variation of carrying capacity and gas holdup profile in the axial was analyzed, with their internal relations and effect on separation performance also investigated. It is shown that the axial gas holdup increases from the bottom to the top when the feed rate is less than critical velocity. But it is opposite when more than or equal to critical velocity, which decreases with the increase of feed concentration. Increasing feed rate, the carrying capacity first increases and then decreases, whose inflection point just is the critical velocity. The feed concentration increase can help improve the carrying capacity and the combustible recovery within a certain range. The carrying capacity prediction model is proposed with the squared correlation coefficient $R^2=0.873$, which achieves a relatively high fitting precision.

Key words: column flotation; carrying capacity; gas holdup; axial distribution

近年来,旋流-静态微泡柱浮选设备充分利用其在产业化方面的良好发展机遇,实现了大型化与系列化,并广泛应于煤矿、非金属矿和金属矿领域,取得了显著的社会经济效益。大型旋流-静态微泡浮选床成为柱浮选技术发展的代表性设备^[1-3]。

在柱浮选设备中,承载能力和气含率是影响设备回收能力和分选效果的重要参数。因此承载能力和气含率就成为柱浮选研究的重要课题,国内外许多学

者做了大量工作。胡卫新、程瑜等^[4-5]分别探讨了微泡浮选柱和射流浮选柱气含率的影响因素;张敏等^[6]分析了浮选柱气含率大小对煤泥分选的影响;李延峰等^[7-8]研究了筛板充填浮选柱气含率的轴向分布;刘焕胜等^[9-10]对浮选柱的面积负荷与气泡最大负载进行了理论计算;Salas A U等^[11-12]分析了影响浮选柱承载能力的因素和其对硅砂回收率的影响;Garibay R P等^[13]研究了浮选柱承载能力与捕集区

收稿日期:2012-08-08 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214900);国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金资助项目(50921002);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12_0955)

作者简介:廖寅飞(1986—),男,江西赣州人,博士研究生。E-mail: ruiyin@126.com

高度的关系,但这些研究大多数是单独针对承载能力或气含率。本文通过测定浮选床煤泥柱浮选过程的承载能力与气含率轴向分布,分析各自的变化规律和对煤泥分选效果的影响,并探索两者间的内在联系,为柱浮选设备进一步发展提供理论指导。

1 试 验

1.1 试验装置

试验是在河南某选煤厂 FCSMC-3 000 mm×6 000 mm 旋流-静态微泡浮选床上完成的,试验装置如图 1 所示,主要包括浮选床系统、测试系统和变频控制系统等 3 部分。浮选床上设计安装了 6 个压力传感器,用来测量气含率的轴向分布和液面高度,两个接口之间相隔 0.5 m(6 号压力传感器距柱体底部距离为 2.0 m)。采用阀门调节入料流速和气体流速,并用液体流量计和气体流量计测定流速。变频器调节底流泵和循环泵转速,控制浮选床液面高度和循环泵出口压力,底流泵和循环泵分别为 11 kW 和 110 kW。

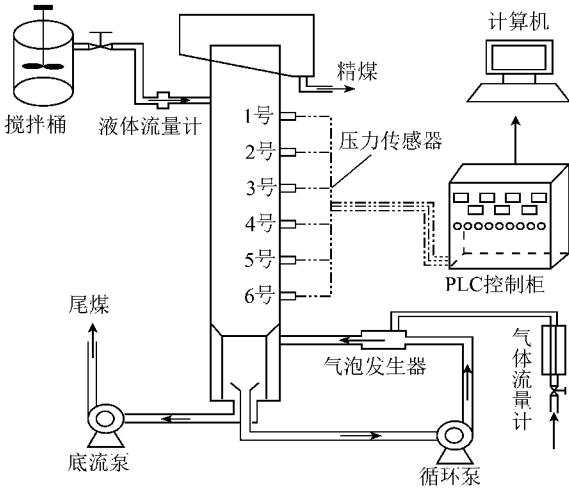


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experiment device

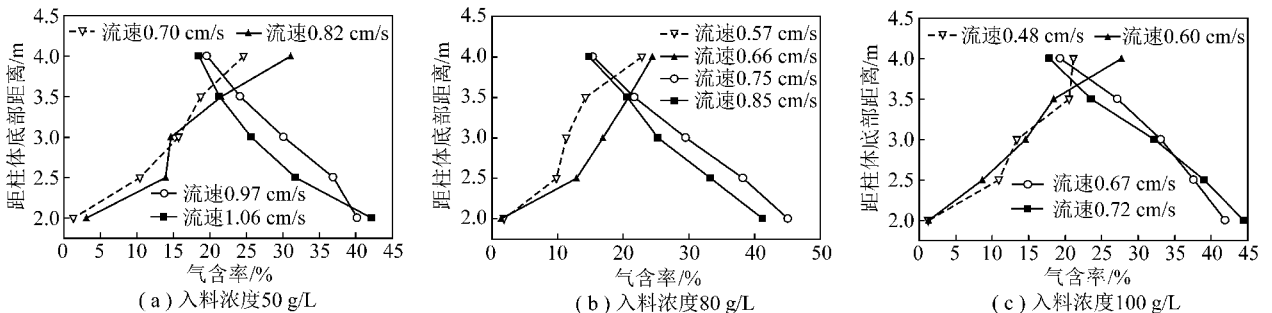


图 2 入料浓度和流速对气含率轴向分布的影响

Fig. 2 Effect of the concentration and feed rate on the axial profile of gas hold-up

1.2 试验参数及测定方法

煤泥柱浮选承载能力是指柱浮选设备的单位横断面进入泡沫产品的固体质量流量,也就是单位时间、单位横断面内柱浮选设备的精煤浮出量^[14]。试验中精煤产量除以横截面积与时间的乘积即为承载能力。气含率是指一定容器内气体占有空间的体积,气含率采用压差法测定^[15],计算公式为

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta p}{\rho_s g h} \tag{1}$$

式中, ε 为两个接口之间的局部气含率; Δp 为充气时两个接口之间的压力差; ρ_s 为不充气时矿浆的密度; h 为两个接口之间的距离。

试验固定气体流速 1.66 cm/s,循环泵出口压力 0.28 MPa,液面高度 5 m。主要操作参数为:入料浓度(50,80,100 g/L)、入料流速(0.4~1.1 cm/s)。样品为正常生产时的浮选入料,粒度组成见表 1。捕收剂选用煤油,用量固定为 500 g/t;起泡剂选用松醇油,用量固定为 100 g/t。

表 1 浮选入料的粒度组成

Table 1 Size distribution of the flotation feed

粒级/ mm	产率/ %	灰分/ %	筛上累计/%		筛下累计/%	
			产率	灰分	产率	灰分
0.250~0.500	1.38	4.90	1.38	4.90	100	18.07
0.125~0.250	8.28	7.71	9.66	7.31	98.62	18.25
0.074~0.125	16.90	9.09	26.56	8.44	90.34	19.22
0.045~0.074	21.03	14.15	47.59	10.96	73.44	21.55
<0.045	52.41	24.52	100	18.07	52.41	24.52
总计	100	18.07				

2 结果与讨论

2.1 气含率轴向分布

在不同入料浓度下调整入料流速,得到气含率的轴向分布情况,如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 当入料流速较小时, 气含率在轴向上呈现出从底部到顶部依次增大的分布趋势。这主要是因为当气泡从液体静压大的底部运动到静压小的顶部时, 气泡体积不断增大而导致气含率沿轴向不断增大。因此在入料流速较小时气含率的轴向分布是符合气泡运动规律的。当入料流速增大到一定程度(临界流速)时, 气含率在轴向上呈现相反的分趋势, 即从底部到顶部依次减小。

比较不同入料流速的尾煤状态(图 3)可以发现: 流速增大后, 尾煤残留的气泡明显增多。说明流速增大后矿化气泡在柱体底部发生了聚集, 从而导致气含率从底部到顶部逐渐减小。另外随着入料浓度的升高, 气含率轴向分布发生逆变的临界流速逐渐减小。这主要是因为随着入料浓度的升高, 气泡黏附的矿粒增多, 矿化气泡的密度增大, 从而导致矿化气泡更容易在柱体底部发生聚集^[11-13], 引起气含率轴向分布的逆变。

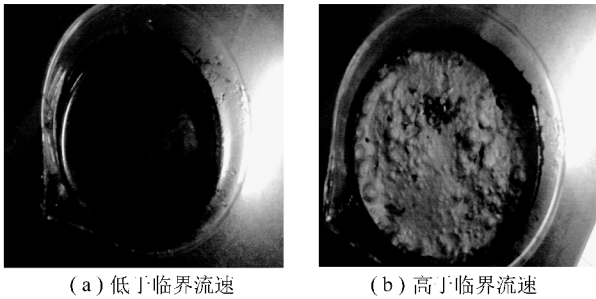


图 3 不同入料流速的尾煤状态对比
Fig. 3 Comparison of the tailings state in different feed rates

2.2 承载能力变化规律

不同入料浓度时承载能力随入料流速的变化如图 4 所示。由图 4 可知, 在一定浓度下, 随着流速的增大, 承载能力逐渐增大, 当流速增大到一定值后, 承载能力逐渐减小。同时承载能力随流速变化的拐点正好是气含率轴向分布发生逆变的临界流速, 说明正常的气含率轴向分布是保持和提升承载能力的关键。另外, 在相同流速下, 高浓度的承载能力要大于低浓度, 因此在一定范围内浓度的升高有利于提升承载能力。

在 3 种入料浓度下调整入料流速, 得到入料干煤泥量与精煤可燃体回收率的关系(图 5)。从图 5 可以看出: 在相同浓度下, 随着干煤泥量的增大, 可燃体回收率逐渐降低。在干煤泥量相同时, 高浓度的可燃体回收率高于低浓度; 同时在相同可燃体回收率下, 高浓度的干煤泥量明显高于低浓度, 所以在一定范围内浓度的升高有利于提高煤泥的可燃体回收率。

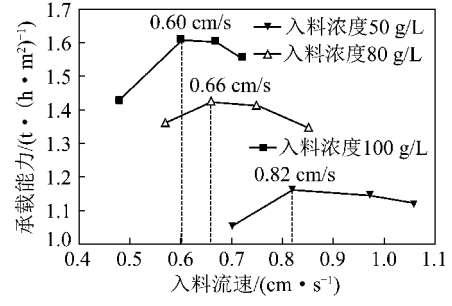


图 4 入料浓度和流速对承载能力的影响
Fig. 4 Effect of the concentration and feed rate on the carrying capacity

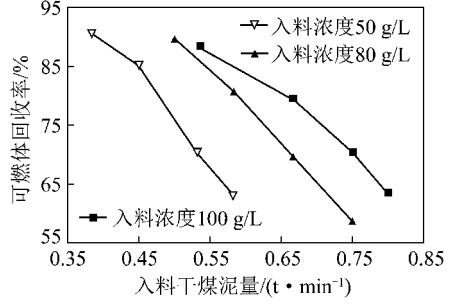


图 5 入料干煤泥量与精煤可燃体回收率的关系
Fig. 5 The relationship between dry slime quantity in the feed and the combustible recovery

2.3 承载能力预测模型

柱浮选中承载能力^[16]可以表示为

$$C_a = \rho_b J_g \tag{2}$$

式中, C_a 为承载能力; ρ_b 为矿化气泡的密度; J_g 为柱体内的表观气速。

为计算矿化气泡(图 6)的密度, 假设^[16]: ① 相对于气泡, 矿粒的体积很小; ② 每个矿粒占据了 d_p^2 的气泡表面积; ③ 矿粒在气泡表面是单层覆盖的, 气泡被覆盖系数为 K_1 。

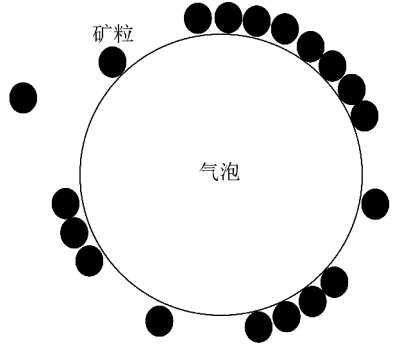


图 6 矿化气泡示意
Fig. 6 Schematic diagram of mineralized bubble

矿化气泡的密度为

$$\rho_b = \frac{K_1 n_p V_p \rho_p}{V_b + K_1 n_p V_p} \tag{3}$$

$$n_p = \frac{\pi d_b^2}{d_p^2} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \quad (5)$$

$$V_b = \frac{1}{6} \pi d_b^3 \quad (6)$$

式中, n_p 为矿粒数目; V_p 为矿粒体积; V_b 为气泡体积; ρ_p, d_p 为矿粒的平均密度和平均直径; d_b 为气泡直径。

将式(4)~(6)代入式(3)得到

$$\rho_b = \frac{K_1 \pi d_p \rho_p}{d_b + K_1 \pi d_p} \quad (7)$$

考虑到 d_b 远大于 $K_1 \pi d_p$, 所以矿化气泡密度可表示为

$$\rho_b = \frac{K_1 \pi d_p \rho_p}{d_b} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)得到

$$C_a = \frac{K_1 \pi d_p \rho_p J_g}{d_b} \quad (9)$$

柱体内气泡直径与表观气速的关系可表示为

$$d_b \propto J_g^q \quad (10)$$

其中, $q > 0.25$ 。承载能力表示为

$$C_a = K_1 \pi d_p \rho_p J_g^{1-q} \quad (11)$$

在浮选床正常工作范围内, 表观气速为 1.5 ~ 3.0 cm/s, 式(11)中的 q 接近于 1^[16]。因此承载能力可表示为

$$C_a = K d_p \rho_p \quad (12)$$

式中, $K = \pi K_1$ 。

另外, 矿粒平均直径可以用 d_{80} 或 d_{50} 表示, 即筛下率为 80% 或 50% 的粒径。相对而言, 煤泥柱浮选的粒度偏粗, 选用 d_{50} 表示矿粒平均直径。根据相关研究和文献报道^[14], K 取 0.03, 用于计算实际承载能力。因此, 最终确立煤泥柱浮选的承载能力预测模型为

$$C_a = 0.03 d_{50} \rho_p \quad (13)$$

采用 BT-9300HT 激光粒度分布仪测定精煤的平均直径 d_{50} , 并通过小浮沉试验确定精煤的平均密度 ρ_p , 将 d_{50} 和 ρ_p 代入式(13)进行承载能力的预测。为更直观地观察模型的预测准确度, 模型预测值与试验值的关系如图 7 所示。

从图 7 可以看出: 数据点比较均匀地分布在拟合直线两侧, 预测值与试验值基本吻合, 线性拟合的相关系数平方 $R^2 = 0.873$, 承载能力预测模型达到了较高的预测精度。

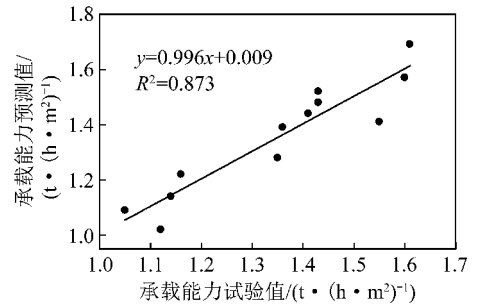


图 7 模型预测值与试验值的比较

Fig. 7 Comparison between the predicted of model values and experimental values

3 结 论

(1) 气含率轴向分布随入料浓度和流速变化的规律为: 当入料流速小时, 气含率在轴向上从底部到顶部依次增大; 当流速达到临界流速或以上时, 气含率轴向分布发生逆变, 从底部到顶部依次减小; 随着入料浓度的升高, 发生逆变的临界流速逐渐减小。气含率轴向分布逆变的主要是因为流速增大或浓度升高后矿化气泡在柱体底部发生了聚集。

(2) 承载能力与气含率轴向分布、入料流速和浓度的关系为: 随着入料流速的增大, 承载能力先增大后减小, 拐点正好为气含率轴向分布发生逆变的临界流速, 气含率的轴向分布直接影响柱浮选承载能力; 在一定范围内, 浓度的升高有利于提升柱浮选的承载能力和提高精煤的可燃体回收率。

(3) 选用 d_{50} 代表矿粒平均直径, 推导并确定了煤泥柱浮选的承载能力预测模型, 数据拟合结果表明: 预测值与试验值基本吻合, 相关系数平方 $R^2 = 0.873$, 预测模型达到了较高的预测精度。

参考文献:

- [1] 刘杰, 吕鑫磊, 安小强, 等. 粉煤灰脱碳的浮选试验研究[J]. 选煤技术, 2009(1): 10-13.
Liu Jie, Lü Xinlei, An Xiaoqiang, et al. Experiment research of flotation on decarbonization from fly ash[J]. Coal Preparation Technology, 2009(1): 10-13.
- [2] 吴彬, 周长春, 安小强, 等. 利用旋流-静态微泡浮选柱选铝土矿的实验室研究[J]. 轻金属, 2009(9): 6-9.
Wu Bin, Zhou Changchun, An Xiaoqiang, et al. Lab research on bauxite by cyclonic static microbubble flotation column[J]. Light Metals, 2009(9): 6-9.
- [3] 刘炯天. 柱分选设备系列化及大型旋流-静态微泡浮选床[J]. 选煤技术, 2000(5): 1-4.
Liu Jiongtian. Serialization of column separation equipment and large scale cyclone-static microbubble flotation bed[J]. Coal Preparation Technology, 2000(5): 1-4.
- [4] 胡卫新, 刘炯天, 李振, 等. 旋流-静态微泡浮选柱气含率影响

- 因素研究[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(4):617-621.
- Hu Weixin, Liu Jiongtian, Li Zhen, et al. Research on factors influencing gas hold-up of a cyclonic-static microbubble flotation column [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010, 39(4):617-621.
- [5] 程 瑜,宋永胜,李 宾. 旋流喷射浮选柱气含率影响因素研究[J]. 金属矿山,2008(12):116-120.
- Cheng Yu, Song Yongsheng, Li Bin. Study on the factors influencing the gas hold-up of swirl injection flotation column [J]. Metal Mine, 2008(12):116-120.
- [6] 张 敏,刘炯天,张建强. 浮选柱气含率及其影响因素对煤泥分选的研究[J]. 煤炭学报,2009,34(6):823-826.
- Zhang Min, Liu Jiongtian, Zhang Jianqiang. Study of flotation column gas holdup and influence factors to slurry separation [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6):823-826.
- [7] 李延峰,张 敏,刘炯天. 浮选柱充填方式及其优化[J]. 煤炭学报,2008,33(4):431-434.
- Li Yanfeng, Zhang Min, Liu Jiongtian. Packing mode and optimization of flotation column [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(4):431-434.
- [8] 李延峰,张 敏,刘炯天. 浮选柱筛板充填的气含率研究[J]. 中国矿业大学学报,2008,37(2):255-258.
- Li Yanfeng, Zhang Min, Liu Jiongtian. Study of gas content in a sieve packing flotation column [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2):255-258.
- [9] 刘焕胜,欧泽深. 逆流浮选的面积负荷与浮选柱直径及高度设计[J]. 煤炭学报,2002,27(1):97-102.
- Liu Huansheng, Ou Zeshen. Area load of countercurrent flotation, design of flotation column diameter and height [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1):97-102.
- [10] 刘焕胜,欧泽深. 逆流浮选的实际平衡与充气量[J]. 煤炭学报,2001,26(1):96-100.
- Liu Huansheng, Ou Zeshen. Phase equilibrium and aeration rate of countercurrent flotation [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(1):96-100.
- [11] Salas A U, Garibay R P, Alonso F N. Operating parameters that affect the carrying capacity of column flotation of a zinc sulfide mineral [J]. Minerals Engineering, 2007, 20:710-715.
- [12] Salas A U, Gomez P L, Garibay R P, et al. Overloading of gas bubbles in column flotation of coarse particles and effect upon recovery [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 71:167-178.
- [13] Garibay R P, Gallegos A P M, Uribe S A, et al. Effect of collection zone height and operating variables on recovery of overload flotation columns [J]. Minerals Engineering, 2002, 15:325-331.
- [14] Sastri S R S. Carrying capacity in flotation columns [J]. Minerals Engineering, 1996, 4:465-468.
- [15] 张 敏,张建强,刘炯天,等. 浮选柱泡沫层检测控制系统的研究[J]. 矿山机械,2010(19):107-110.
- Zhang Min, Zhang Jianqiang, Liu Jiongtian, et al. Study on detection and control system for foam layer of flotation column [J]. Mining & Processing Equipment, 2010(19):107-110.
- [16] Patwardhan A, Honaker R Q. Development of a carrying-capacity model for column froth flotation [J]. International Journal of Mineral Processing, 2000, 59:275-293.