

微细粒浮选的微观湍流强化*

曹亦俊^{1,4}, 闫小康^{1,2}, 王利军³, 王爱^{1,2}

(1. 中国矿业大学 国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116; 4. 郑州大学 河南省资源与材料工业技术研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: 浮选是分离微细粒矿物的主要分选方法。微细粒矿物质量小、惯性低, 难以与气泡发生矿化反应, 是浮选回收率低的主要原因之一。从动力学角度, 将经典微观浮选动力学与湍流理论结合起来, 计算了不同湍流强度下微细粒矿物与气泡的矿化反应效率, 分析了微观湍流对微细粒矿物浮选动力学行为的影响, 得到不同湍流强度下的矿化反应规律, 并探讨了强化微细粒回收的湍流方法。

关键词: 微细粒; 浮选; 湍流; 煤

中图分类号: TD91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0076(2017)02-0113-06

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.02.021

The Micro-turbulence Intensification on the Fine Minerals Flotation

CAO Yijun^{1,4}, YAN Xiaokang^{1,2}, WANG Lijun³, WANG Ai^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Coal Preparation & Purification, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. School of Power Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 4. Henan Province Industrial Technology Research Institute of Resources and Materials, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: Flotation is the mainstream method to separate micro-fine mineral particles. The nature of micro-fine mineral, low inertia due to the small mass, makes it hard to collide with bubble, which results in poor flotation recovery rate. This paper analysed the collection efficiency of micro-fine mineral under conditions of different turbulence intensity and based on a combination of micro-flotation kinematics and turbulence theory. The effect of micro-turbulence on micro-fine particle flotation performance was explored. Finally, the turbulence enhancement for micro-fine particles was put forth based on the collection efficiency under different turbulent conditions.

Key words: fine minerals; flotation; turbulence; intensification

引言

浮选是分离微细矿粒的主要分选方法。微细矿

粒质量小、动能低, 与气泡的碰撞概率低^[1], 难以和气泡发生矿化反应, 制约了微细粒矿产资源的回收。

浮选是物理化学、表面化学、电化学、流体动力

* 收稿日期: 2017-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB214905); 国家自然科学基金面上项目(51574240)

作者简介: 曹亦俊(1969-), 男, 山东淄博人, 博士, 主要从事微细粒分选研究。

学和反应动力学共同作用的过程。在浮选药剂、选择性絮凝等界面调控方面,国内外学者已经进行了卓有成效的研究^[1],如应用微孔材料或者超声波空化作用^[2]及加压溶解气体^[3-5]等方法降低气泡尺寸^[6-9],或者通过选择性絮凝^[10、11]或聚团^[12、13]等手段增大颗粒表观尺寸^[14-17],有效提高了微细粒与气泡的矿化反应效率。但浮选流体动力学方面的研究较为滞后,矿物浮选大多在湍流环境中进行,无论是低湍流的浮选柱,还是高湍流的浮选机,其中,宏观湍流起着悬浮和输送固体颗粒、促使气泡弥散作用。这方面研究已经取得了大量成果^[18-23],很多学者通过计算浮选设备内部的宏观湍流场对设备结构及操作参数进行优化,以达到减少颗粒沉积或缩小循环死区,使颗粒、气泡的浓度和分布达到适合的状态等目的。然而,对于微细粒的分选,宏观层面的湍流强化已不足以解决问题,微观湍流直接作用于颗粒与气泡的碰撞及脱附,是影响微细粒浮选的关键要素。

微观湍流对矿物浮选的影响,国外文献主要集中在机理研究机理,以 Heinrich Schubert^[24-26]为代表,基于浮选槽叶轮搅拌产生的湍流场,讨论了湍流最小涡尺度及能量耗散率对颗粒及气泡行为的影响机理。Anh V. Nguyen 等^[27]研究了在湍流环境下颗粒与气泡的微观相互作用行为,2016 年 Anh V. Nguyen 等总结了湍流对浮选中颗粒与气泡相互作用的研究进展^[28],并指出微观湍流对浮选的影响还

处在定性研究阶段,定量研究还需要尽快开展。国内方面,曾克文、余永富等^[29]通过改变叶轮转速研究了浮选槽中矿浆紊流强度对矿物浮选的影响,指出强湍流可促进气泡-矿粒间的碰撞,同时也可能会造成已矿化气泡上颗粒的脱落。程宏志、蔡昌凤等^[30]的研究也证实了随湍流强度增大颗粒-气泡的碰撞概率以及脱落概率的同时增加。刘炯天在 2000 年提出基于强湍流的管流矿化^[31]方法,将其集成在旋流静态微泡浮选柱中,作用于难浮微细粒矿物的回收,现已实现工业化应用。

在微观湍流作用矿化反应方面,国外学者更侧重微观机理研究,其研究结果对浮选槽的湍流调控有指导作用,国内这方面研究内容可见报道的相对较少,以应用为主。

1 湍流作用下的微细粒矿化反应

浮选过程中颗粒被气泡捕获的概率可以用式(1)计算^[14]:

$$P = P_c \cdot P_a (1 - P_d) \tag{1}$$

式中, P_c 、 P_a 与 P_d 分别为矿粒与气泡的碰撞、粘附及脱附概率。

通过对 Yoon RH 和 Luttrell GH^[6]建立的碰撞概率及粘附概率、Woodburn E. T., KING R. P.^[32]及 Schulze H J^[33]建立的脱附概率计算模型的研究,整理得出不同流态下的矿粒的捕获概率公式,如表 1 所示。

表 1 不同湍流强度下矿粒的捕获概率

层流 (低雷诺数)	$P = 1.5 \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \cdot \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left[\frac{-3u_b t_i}{2R_b (R_b/R_p + 1)} \right] \right] \cdot \left(\frac{d_p}{d_{\max}} \right)^{3/2}$ $R_{p\max} = \sqrt{\frac{3r_{lg} \sin \left(180^\circ - \frac{1}{2}\theta \right) \sin \left(180^\circ + \frac{1}{2}\theta \right)}{2 - [(\rho_p - \rho_f)g + 1.9\rho_p \varepsilon^{2/3} R_b^{-1/3}]}}$
中间流 (中等雷诺数)	$P = \left(\frac{3}{2} + \frac{4Re_b^{0.72}}{15} \right) \left(\frac{d_p}{d_b} \right)^2 \cdot \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left[\frac{-(45 + 8Re_b^{0.72})u_b t_i}{30R_b (R_b/R_p + 1)} \right] \right] \cdot \left(\frac{d_p}{d_{\max}} \right)^{3/2}$
势流 (高度湍流)	$P = 3 \left(\frac{d_p}{d_b} \right) \cdot \sin^2 \left[2 \arctan \exp \left[\frac{-3u_b t_i}{2(R_b + R_p)} \right] \right] \cdot \left(\frac{d_p}{d_{\max}} \right)^{3/2}$

以某一性质相同粒度不同的颗粒(接触角 $\theta = 80^\circ$, 气泡密度 $\rho_b = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 颗粒密度 $\rho_p = 1\ 500 \text{ kg/m}^3$, 水密度 $\rho_f = 1\ 000 \text{ kg/m}^3$, 表面张力 $\sigma = 0.062 \text{ N/m}$) 为例, 利用表 1 计算了层流、中间流(中等湍

流)与高湍流下的捕获概率。如图 1 所示,层流环境下,随着颗粒粒度增大,捕获概率增大;中等湍流下,颗粒的捕获概率随粒度的增大,先增加后减少;高度湍流下,颗粒粒度越大,捕获概率越低。也就是

说,强湍流环境更有利于微细颗粒浮选。

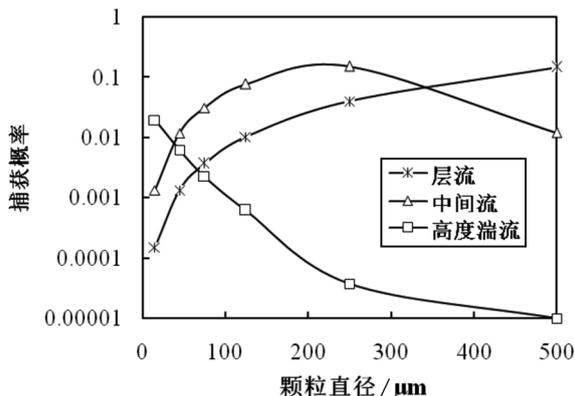


图1 不同湍流强度下的颗粒捕获概率

2 湍流作用下的颗粒与气泡运动

湍流场由不同尺度的涡构成,大尺度涡由施加在流体域上的边界条件提供能量,由平均速度梯度(宏观应变率)产生,受流场几何尺寸和边界条件影响;小尺度涡是引起微观脉动,也就是作用于微观矿化的主要动力,其脉动频率较高,最终由于流体的黏性作用耗散消失,转化为流体的内能。

湍流动能耗散率 ε , 单位质量流体在单位时间内损耗的湍流动能,主要表征由于流体黏性剪切力引起的小尺度涡的能量耗散,和脉动速度法向梯度和流体黏性相关,是影响微观反应动力学的重要物理量,由式(2)定义:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中, μ 为湍流黏度, $Pa \cdot S$ 。 ε 越大,意味着流体的黏性剪切力高,脉动速度在法向上的梯度大,带来的是涡的尺度被“撕裂”得越小,湍流能量耗散越快。

(1) 湍流涡特征

微观涡是决定浮选设备理论上能够浮选的细粒下限,介于颗粒尺寸与气泡尺寸之间的涡更能有效作用于颗粒运动^[34]。最小涡尺度 λ_D 由卡门格罗夫公式(3)计算:

$$\lambda_D = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (3)$$

式中: ν - 液体运动黏度, m^2/s ; ε - 能量耗散率, W/kg 或 m^2/s^3 。

由公式(3)可知,涡尺寸与湍流动能耗散率相关,耗散率越大,涡尺寸越小,越能有效作用于微小尺度的颗粒。

(2) 湍流对颗粒运动的影响

浮选过程中颗粒的运动主要是由湍流脉动引起的,湍流场中半径为 R_p 的颗粒获得的动能 E_p 为^[35]:

$$E_p = 0.67 \frac{\varepsilon^{8/9} R_p^{41/9} \rho_p}{\nu^{2/3}} \left(\frac{\Delta \rho_p}{\rho_f} \right)^{4/3} \quad (4)$$

式中, ρ_f - 矿浆密度, kg/m^3 ; $\Delta \rho_p = \rho_p - \rho_f$, kg/m^3 。

由式(4)可知,颗粒获得的动能 E_p 与湍流动能耗散率以及颗粒半径成正比,提高湍流动能耗散率可以有效提高流体脉动和颗粒之间的动能传递效率,从而增加颗粒动能。

(3) 湍流对气泡尺寸的影响

湍流场中的大尺度涡促进气泡弥散,小尺度涡才能使气泡发生振荡和变形,并为气泡发生破裂提供足够的表面能增量,在表面张力和流体密度一定的条件下,湍流动能耗散率越大,气泡尺寸越小^[36]。

可见,湍流动能耗散率 ε 越大,涡尺度越小,越能作用于微细尺度颗粒,涡动能越高,微细粒获得的动能则越高,气泡也被“撕裂”得越小。

3 基于高效矿化的微观湍流调控

强化湍流最直接的方法是提高外部能量的输入,增大流体速度,如提高浮选机叶轮转速等,但该方法必然会带来能量损耗的提高;另外一种方法是通过结构设计,如静态混合器等,在不增加能量输入的情况下,可在流动方向局部产生剧烈的涡流,提高湍流耗散,促进颗粒在流体中的均匀分布,强化颗粒与气泡的碰撞,下文以三角翼涡发生器为例,研究其对细粒分选强化效果。

3.1 涡发生器结构设计及湍流强化

基于上述湍流动能耗散的研究,结合旋流静态-微泡浮选柱中强湍流的管流矿化方式^[31],探讨了采用内置涡发生器强化管内湍流的方法。使用计算流体力学 FLUENT 软件计算了管内的湍流耗散,并通过煤泥分选试验验证了微细粒分选效果^[37]。

图2为带涡流发生器的管流段几何模型,涡流发生器对流场的影响主要有改变流场湍流涡结构及改变流场的湍流强度两方面。图3为流场计算结果中提取的涡结构,结果表明,流体流经涡流发生器后,会有一对细长的涡管形成,是典型的流向涡,并且在这对流向涡之间存在强烈的相互掺混作用,强

化了颗粒与气泡的碰撞。

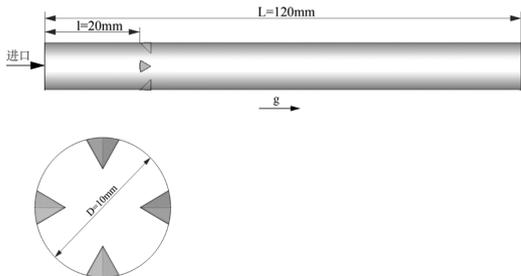


图2 带涡流发生器的管流段几何模型

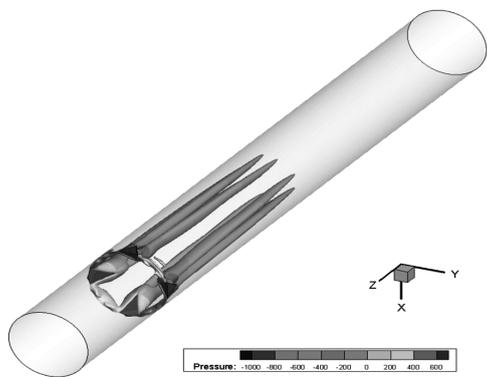
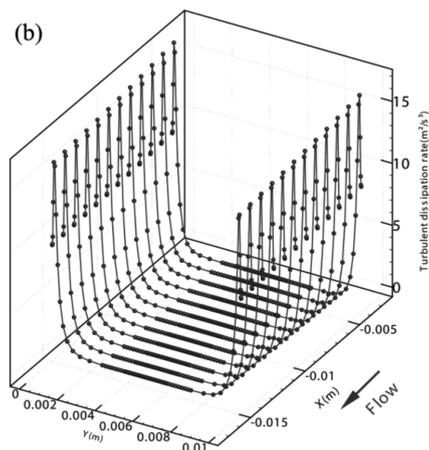
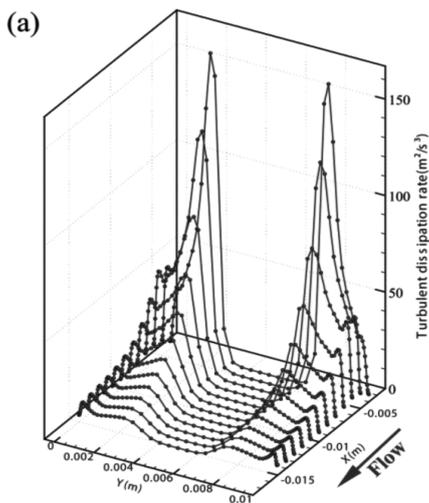


图3 流向涡的形成

在涡发生器下游每隔 1 mm 提取截面上的湍流动能耗散率 ϵ 值,与未安装涡发生器的光管进行对比,如图 4 所示。在流动方向上,内置涡发生器下流场特征截面上的湍流耗散极大值从 $10 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 增加至 $150 \text{ m}^2/\text{s}^3$,而未安装涡发生器的光管的湍流动能耗散率 ϵ 的极大值始终为 $15 \text{ m}^2/\text{s}^3$,可见安装内置涡发生器后,管内湍流动能耗散率有了很大提升。当涡发生器组数从 0 增加到 5 组时,平均湍流动能耗散率从 $1.99 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 增加到 $11.8 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。



(a) 内置涡发生器;(b) 光管
图4 湍流动能耗散率

3.2 煤泥分选试验验证

试验煤样取自淮北矿业集团临涣选煤厂浮选入料,粒度分布如表 2 所示。

表2 试验煤样粒度分布表

粒级/mm	产率/%	灰分/%	筛上累计		筛下累计	
			产率 /%	灰分/%	产率 /%	灰分/%
+0.25	24.72	13.47	24.72	13.47	100	25.14
-0.25 +0.125	18.81	19.66	43.54	16.14	75.28	28.98
-0.125 +0.074	14.94	24.51	58.48	18.28	56.46	32.08
-0.074 +0.045	8.01	25.55	66.49	19.16	41.52	34.81
-0.045	33.51	37.02	100	25.14	33.51	37.02

试验设备采用 $\Phi 100$ 旋流静态微泡浮选柱,在其管流段内置 5 组三角翼涡发生器,布置方式为交叉排列,间距为 20 mm。进行煤泥分选试验验证,

并与无内置涡发生器的光管结果进行比较,结果如图 5 所示。

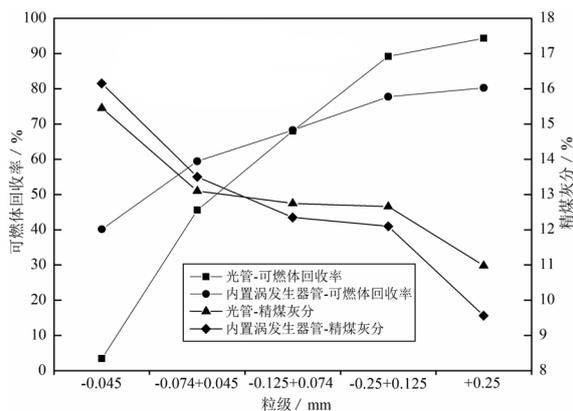


图5 内置涡发生管作用下煤泥浮选试验结果

由图5可知,浮选柱增加三角翼涡发生装置, $-0.074 + 0.045$ mm 和 -0.045 mm 两个粒级的可燃体回收率提高较为明显,但 $+0.25$ mm、 $-0.25 + 0.125$ mm 两个粒级的可燃体回收率降低。可见,高度湍流环境下,细粒的回收能力确实有所增强,但不利于粗粒的回收。另外,高度湍流环境下,有内置涡发生器时精煤细粒度灰分增加,说明分选选择性变差。

4 结论

将经典微观浮选动力学与湍流理论结合,分析了微观湍流对微细粒矿物浮选动力学行为的影响,探讨了微细粒回收的湍流强化方法。主要结论如下:

(1) 不同粒度矿粒的浮选,需要与其匹配的不同程度的湍流环境,强湍流环境更有利于微细颗粒浮选。

(2) 湍流动能耗散率越大,涡尺度越小,越能作用于微细尺度颗粒,涡动能越高,微细粒获得的动能则越高,同时,气泡也被“撕裂”得越小。

(3) 安装三角翼形涡流发生器可强化管内湍流,涡调控前后管流段内的流场发生了变化,形成了成对的流向涡,有利于各相流体在管流段中的掺混,湍流动能耗散率在流体流经涡流发生器后明显增大,可有效提高细粒度回收率,煤泥分选试验也取得了一致的结果。

参考文献:

[1] Miettinen T, Ralston J, Fornasiero D. The limits of fine particle flotation[J]. Minerals Engineering, 2010,23:420-437.

[2] Zhou ZA, Xu Z, Finch JA. On the role of cavitation in particle collection during flotation—a critical review[J]. Minerals Engineering, 2009,22:419-433.

[3] Matis KA, Gallios GP. Dissolved air and electrolytic flotation[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1986.

[4] Matis KA. Electrolytic Flotation[M]. Berlin: Springer Netherlands, 1992.

[5] Ambedkar B, Chintala T N, Nagarajan R, et al. Feasibility of using ultrasound-assisted process for sulfur and ash removal from coal[J]. Chemical Engineering & Processing, 2011, 50(3):236-246.

[6] YOON RH, LUTTRELL GH. The effect of bubble size on fine particle flotation[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1989,5:101-122.

[7] YOON RH, LUTTRELL GH. The effect of bubble size on fine coal flotation[J]. Coal Preparation, 1986,2:179-192.

[8] Reay D, Ratcliff GA. Experimental testing of the hydrodynamic collision model of fine particle flotation[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1975,53:481-486.

[9] Ahmed N, Jameson GJ. The effect of bubble size on the rate of flotation of fine particles[J]. International Journal of Mineral Processing, 1985,14:195-215.

[10] Attia YA. Synthesis of PAMG chelating polymers for the selective flocculation of copper minerals[J]. International Journal of Mineral Processing, 1977,4:191-208.

[11] Song S, Lopez-Valdivieso A, Reyes-Bahena JL, et al. Floc flotation of galena and sphalerite fines[J]. Minerals Engineering, 2001,14:87-98.

[12] Koh, P. T. L., Warren, et al. A pilot plant test of the shear-flocculation of ultrafinescheelite[C]. 8th Australian Chemical Engineering Conference, 1980; 90-94.

[13] Warren LJ. Chapter 10 - Shear-flocculation[J]. Developments in Mineral Processing, 1992,12:309-329.

[14] Sutherland KL. Physical chemistry of flotation: kinetics of the flotation process[J]. Journal of Physical & Colloid Chemistry, 1948,52:394.

[15] Trahar WJ, Warren LJ. The flotability of very fine particles—A review[J]. International Journal of Mineral Processing, 1976,3:103-131.

[16] Duan J, Fornasiero D, Ralston J. Calculation of the flotation rate constant of chalcopyrite particles in an ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003,72:227-237.

[17] Pyke B, Fornasiero D, Ralston J. Bubble particle heterocoagulation under turbulent conditions[J]. Journal of

- Colloid & Interface Science, 2003, 265:141 - 151.
- [18] 温新, 刘春江. 一种新型浮选柱的数值模拟及性能研究[J]. 化学工业与工程, 2014, 31:66 - 71.
- [19] 刘炯天, 张敏, 刘焕彬, 等. 筛板充填浮选柱浮选流体的速度场分布[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36:578 - 581.
- [20] 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, 40:120 - 124, 128.
- [21] 刘炯天. 静态微泡浮选柱强化分选方法及装置: CN1209360[P]. 1999 - 03 - 03.
- [22] 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]. 机械工程学报, 2009, 45:84 - 88.
- [23] 沈政昌, 陈建华. 浮选机流场模拟及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [24] Schubert H. On the optimization of hydrodynamics in fine particle flotation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21: 930 - 936.
- [25] Schubert H, Bischofberger C. On the microprocesses air dispersion and particle - bubble attachment in flotation machines as well as consequences for the scale - up of macroprocesses[J]. International Journal of Mineral Processing, 1998, 52:245 - 259.
- [26] Schubert H. On the turbulence - controlled microprocesses in flotation machines International[J]. Journal of Mineral Processing, 1999, 56:257 - 276.
- [27] Nguyen AV, Evans GM, Nalaskowski J, et al. Hydrodynamic interaction between an air bubble and a particle: atomic force microscopy measurements[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2004, 28:387 - 3945.
- [28] Nguyen AV, An - Vo DA, Tran - Cong T, et al. A review of stochastic description of the turbulence effect on bubble - particle interactions in flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2016, 156:75 - 86.
- [29] 曾克文, 余永富, 薛玉兰. 浮选机槽内矿浆紊流强度对氧化矿浮选的影响[J]. 矿产综合利用, 2001(2):19 - 22.
- [30] 程宏志, 蔡昌凤, 张孝钧, 等. 浮选微观动力学和数学模型[J]. 煤炭学报, 1998(5):545 - 549.
- [31] 刘炯天. 旋流 - 静态微泡柱分选方法及应用(之三): 射流微泡与管流矿化的研究[J]. 选煤技术, 2000(3): 1 - 4.
- [32] Woodburn ET, King RP, Colborn RP. The effect of particle size distribution on the performance of a phosphate flotation process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1971, 2:3163 - 3174.
- [33] Schulze HJ. Dimensionless number and approximate calculation of the upper particle size of floatability in flotation machines[J]. International Journal of Mineral Processing, 1982, 9:321 - 328.
- [34] Liu TY, Schwarz MP. CFD - based multiscale modelling of bubble - particle collision efficiency in a turbulent flotation cell[J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64: 5287 - 5301.
- [35] Evans GM, Doroodchi E, Lane GL, et al. Mixing and gas dispersion in mineral flotation cells[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2008, 86:1350 - 1362.
- [36] Hinze JO. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes[J]. AIChE Journal, 1955, 1:289 - 295.
- [37] Wang L, Wang Y, Yan X, et al. A numerical study on efficient recovery of fine - grained minerals with vortex generators in pipe flow unit of a cyclonic - static micro bubble flotation column[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 158:304 - 313.