

文章编号:0253-9993(2011)03-0502-05

搅拌调浆机制的固-液悬浮特性

李 振¹,刘炯天²,曹亦俊²

(1. 西安科技大学 化学与化工学院,陕西 西安 710054;2. 中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221008)

摘 要:通过固-液两相试验来模拟实际调浆过程,根据不同搅拌机制下物料在槽内的分布规律,总结累积浓度方差、区间浓度方差、离底悬浮能力以及有效作用范围等参数及概念来表征物料的悬浮特性,并以此对典型轴流式流场与径流式流场作用于两相介质的功效进行系统的分析,对常用附件(导流筒、挡板)的添加对悬浮效果的影响进行了总结。指出物料悬浮过程是由离底悬浮能力与有效作用范围共同决定的过程。同样操作条件下,物料悬浮水平较低时,搅拌体系的悬浮能力主要由离底悬浮能力决定;在实现较好离底悬浮时,有效作用范围的影响逐渐占据主导地位。

关键词:调浆;悬浮能力;离底悬浮能力;有效作用范围

中图分类号:TD923.2 文献标志码:A

Solid-liquid suspension characteristics of stirred pulp-mixing mechanism

LI Zhen¹, LIU Jiong-tian², CAO Yi-jun²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: By solid-liquid two-phase experiments, the practical pulp-mixing process was simulated. Basing on the material distribution regularity in tank under the effects of different stirred mechanism, the parameters and concepts of cumulative concentration variance, interval concentration variance, just-suspended capacity and effective range were summarized to characterize the suspension characteristics of material, with which systematic analysis on the effect of typical axial flow field and radial flow field's role in two-phase medium was made, while the effect of the addition of common accessories was summarized. It is pointed out that material suspension is a process decided by just-suspended capacity and effect range. Under the same operation condition, suspension capacity of stirred system is decided by just-suspended capacity when the suspension level is low, while effect range gradually becomes dominant when good just-suspended status has been achieved.

Key words: pulp-mixing; suspension capacity; just-suspended capacity; effective range

我国矿产资源的特点日益向着“贫、细、杂、难”的方向发展,浮选作为选别这类矿石的主要方法越来越受到广大选矿科技工作者的关注,近年来在强化矿化、分选环境方面配合矿物分选特性已总结出不同的过程调控因素,特别是在选矿药剂^[1-4]和分选工艺及装备^[5-6]的研究方面取得了较大的成绩,但整个矿物分选过程的研究层面仍未能完全涵盖。其中调浆作为整个浮选作业的出发点,目前还未能有明确的评价

标准以衡量其作业质量及效率^[7-8]。为实现有效解离,矿物往往以细粒、微细粒的尺度进入浮选作业,其突出特点集中在粒度细、选择性差以及微粒互凝等,因此创造必要的矿化条件、实现良好的界面行为,是实现细粒、微细粒矿物高效回收的前提和必要条件^[9-11]。由此调浆技术成为影响后续浮选作业效率的关键技术之一。在实际生产中,调浆单元的作用介质为复杂的固-液两相体系,由于受测量手段的限制

收稿日期:2010-08-24 责任编辑:许书阁

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA05Z339);“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2008BAB31B01);西安科技大学博士启动项目(2010QDJ031)

作者简介:李 振(1983—),男,山东淄博人,讲师,博士。Tel:029-85583183, E-mail:lzmvip@126.com

以及工况的复杂性,迄今对多相调浆搅拌槽内物料分布特性的研究尚不充分,关于不同搅拌机制下调浆体系固体物料悬浮特性的研究鲜有报道。本文通过对典型搅拌流场物料分布特征的考察,归纳表征物料悬浮规律的特性参数,从而实现对不同搅拌机制悬浮物料能力的评价及解析。

1 固-液悬浮特性研究的试验设计

1.1 试验方法

1.1.1 槽体设计

固-液悬浮特性研究所采用的调浆搅拌槽槽体及其附件尺寸按照标准搅拌槽^[12]的一般设计原则进行选定,如图1所示,其中槽径 $D=300$ mm,槽体及附件特征尺寸见表1。搅拌槽配有活动附件:导流筒与挡板(挡板的安装构型为“标准挡板”^[13]),可根据研究需要对附件进行拆装,以考察不同附件对搅拌效果的影响。

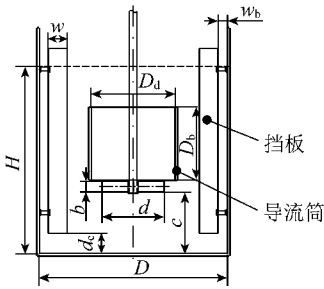


图1 标准搅拌槽设计

Fig.1 The design for standard stirred tank

表1 槽体及附件特征尺寸

Table 1 Feature sizes of tank and accessories

特征参数	H/D	c/D	w/D	d_c/c	W_b/w	D_d/D	D_b/D
值	1/1	1/3	1/10	1/3	1/2	7/20	9/20

注: H 为液面高度,m。

1.1.2 典型搅拌机制对应构型的选定

(1)叶轮单独作用下的典型轴流式与径流式流场。选取叶轮直径 $d=99$ mm,叶片宽度 $b=17$ mm,叶片数相同的四折叶开启式涡轮(4PBD,折叶角 $\theta=45^\circ$)与四直叶开启式涡轮(4DBT,折叶角 $\theta=90^\circ$)分别作为轴流式叶轮与径流式叶轮的代(图2),考察叶轮单独作用下各自的悬浮物料性能。

(2)特定的叶轮与特定的附件相配合。通过4PBD添加导流筒(4PBD+导流筒),以及4DBT添加挡板(4DBT+挡板)两种搅拌调浆机制的构建,考察导流筒与挡板在两相体系中的作用特性。

1.1.3 试验介质及操作参数

为模拟实际的调浆介质环境,以水作为液相,固

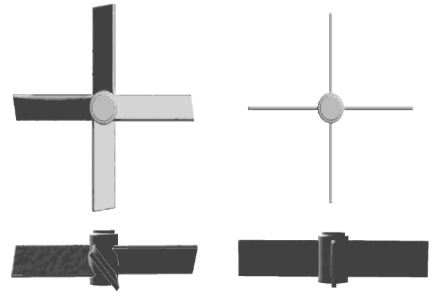


图2 试验选用的叶轮型式示意

Fig.2 Schematic diagram of impeller types used

相选用 $-0.500+0.250$ 、 $-0.250+0.175$ 、 $-0.175+0.125$ 、 $-0.125+0.074$ 、 $-0.074+0.045$ mm五个粒径密度为 $\rho_{\text{glass}}=2.6$ g/cm³的玻璃珠。试验过程中控制转速为400 r/min,即叶轮端速度 $T_s=2.07$ m/s;物料浓度为30%。

1.2 样点的采集

为考察槽内固体分散的真实性,采用“取样法”对搅拌槽内分散相局部浓度进行测量。搅拌槽内的三维流动从几何学上分析为四分之一轴对称,由此确定取样区域为槽体的四分之一。试验设计的采样点如图3所示。

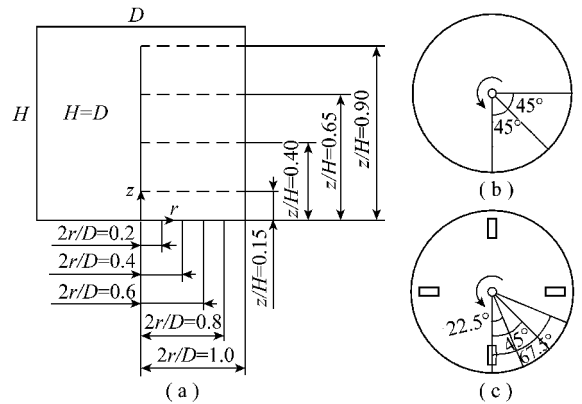


图3 取样点分布

Fig.3 Sample points distribution

(1)轴向取样点采用相对轴向位置的无量纲数 z/H 表示(z 为以槽底中心为原点的轴向高度坐标),选取 $z/H=0.15$ 、 0.40 、 0.65 、 0.90 四个轴向截面高度;

(2)径向取样点采用相对径向位置的无量纲数 $2r/D$ 表示(r 为以槽底中心为原点的径向距离坐标),选定 $2r/D=0.2$ 、 0.4 、 0.6 、 0.8 、 1.0 五个径向距离;

(3)切向取样点:槽内无挡板时,如图3(b)所示,沿叶轮旋转方向取 $\beta=0$ 、 45 、 90° 三个位置作为取样点;设有挡板时,如图3(c)所示,沿叶轮旋转方向取 $\beta=22.5$ 、 45 、 67.5° 三个位置作为取样点,分别对应

挡板后、两挡板之间以及挡板前3个特征位置。

2 不同搅拌机制下的物料分布特征

2.1 样点数据处理

为直观表征取样点的物料浓度特征,在对样品浓度进行数据分析时,将其固含量表示成悬浮百分比($\varphi/\Phi, \%$)的形式,即

$$\frac{\varphi}{\Phi} = \frac{\text{取样点固体质量分数}}{\text{全槽平均的质量分数}} \times 100$$

为节省篇幅仅列出 $-0.074+0.045$ mm 粒级物料在各搅拌机制下的悬浮百分比分布情况予以分析。

2.2 典型流场物料的分布特征

图4为实验构建的各典型流场作用下槽内物料的分布情况。整体上物料浓度梯度主要沿轴向变

化:轴向高度增加,悬浮物料能力迅速下降。轴流式流场作用下(图4(a)),一定轴向高度范围内轴向浓度梯度较小,同时各轴向高度对应的不同径向位置间浓度梯度较小;径流式流场作用下(图4(b))槽底中心存在明显的高浓度区域,表征着其对应区域有产生沉积的趋势,且相对于轴流式流场其物料径向浓度梯度较大。导流筒的添加(图4(c))使得一定轴向高度范围内($z/H \leq 0.65$)物料分布均一性显著提高。综合分析图4(a)~(c),在不添加挡板时,物料沿切向不存在明显的浓度递变规律。添加挡板后(图4(d)),一定高度范围内悬浮物料出现一定的均一性;在液面附近的槽壁区域,挡板后的物料浓度略低于挡板之前的物料浓度。但这种浓度差异随着轴向高度与径向距离的减小而渐不明显。

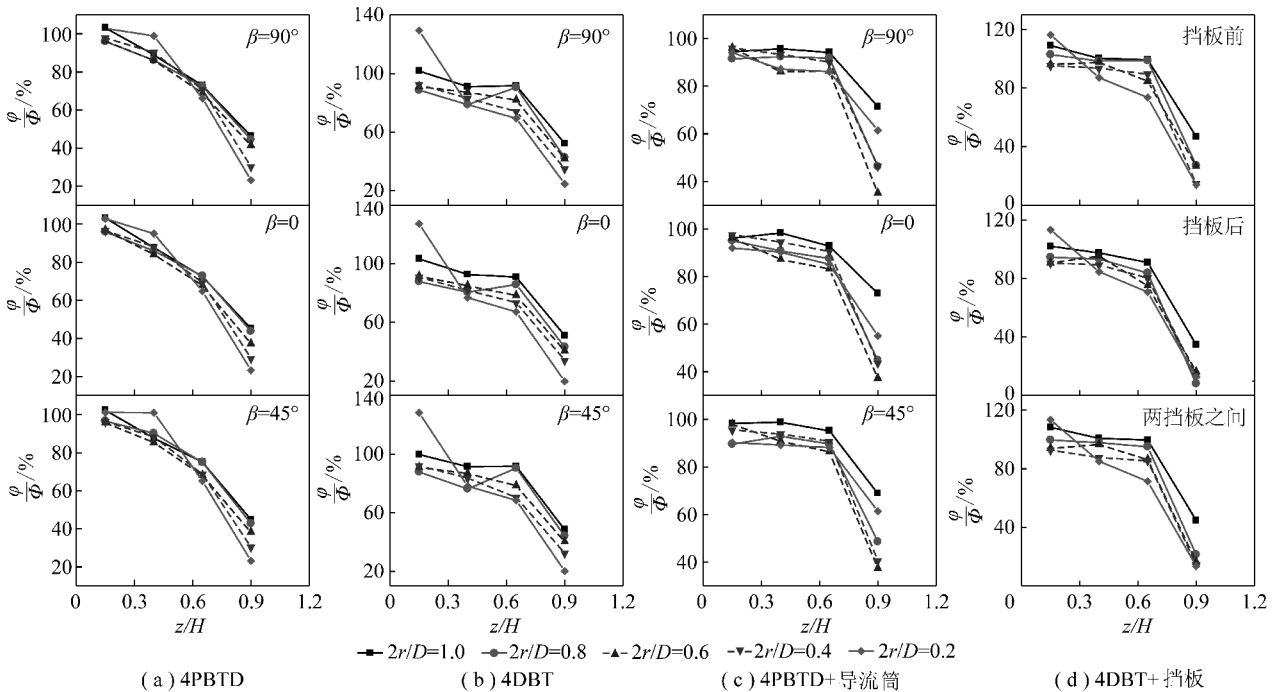


图4 各典型流场作用下 $-0.074+0.045$ mm 物料分布

Fig. 4 Distribution of $-0.074+0.045$ mm materials under the action of each classic flow field

3 搅拌体系悬浮能力的评价

3.1 浓度方差分析

为测算不同研究条件下搅拌槽内物料浓度分布的离散趋势,采用浓度方差 σ^2 来定义其均匀度,即

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\varphi_i}{\Phi} - 1 \right)^2$$

式中, n 为取样数; φ_i 为取样点的固相质量分数, %。

采用累积浓度方差 σ^2 ,即整个槽体所有取样点的浓度方差来表征作用机制的整体物料悬浮水平。显然, σ^2 值越接近于0,则对应物料悬浮水平越高; σ^2 值越接近于1,则对应物料悬浮水平越差。以各轴向

特征位置(z/H)对应所有取样点的浓度方差来反映该轴向位置所处轴向高度区间内的浓度分布情况,记作区间浓度方差 σ_i^2 ,不同轴向区间浓度方差表征轴向浓度梯度的变化。

3.2 悬浮能力规律

表2列出了典型搅拌机制下的 σ^2 值。同一搅拌机制作用下,物料粒度由粗到细的变化过程中, σ^2 值逐渐减小,表征由弱到强的悬浮能力。

(1) $-0.500+0.125$ mm 较粗物料悬浮过程对应各搅拌机制的 σ^2 由小到大依次为: 4PBTD + 导流筒 < 4PBTD < 4DBT + 挡板 < 4DBT。

较粗物料悬浮时,轴流式流场的物料悬浮能力较

强;附件的添加有利于对应搅拌机制悬浮能力的提高。

表2 典型搅拌机制累积浓度方差 σ^2

Table 2 Cumulative concentration variance σ^2 of typical stirred mechanism

物料粒级/mm	σ^2			
	4PBDT	4DBT	4PBDT+导流筒	4DBT+挡板
-0.500+0.250	0.600 2	0.843 4	0.537 1	0.813 8
-0.250+0.175	0.510 4	0.793 7	0.441 4	0.747 5
-0.175+0.125	0.466 9	0.739 1	0.357 4	0.684 8
-0.125+0.074	0.178 5	0.158 1	0.109 8	0.187 9
-0.074+0.045	0.136 4	0.097 6	0.072 2	0.175 5

(2)-0.125 mm 细粒物料悬浮过程对应各搅拌机制的 σ^2 由小到大依次为: 4PBDT + 导流筒 <

4DBT < 4PBDT < 4DBT + 挡板。

细粒物料悬浮过程中,径流式流场较轴流式流场在悬浮能力方面表现出更优的作用效果。导流筒的添加依然使得对应搅拌机制的悬浮能力提高;挡板的添加则使得对应搅拌机制的悬浮能力降低。

各搅拌机制作用于粗、细物料反映出的悬浮能力差异表明:搅拌过程中控制颗粒悬浮状态的因素不唯一。因此有必要从各轴向区间的物料分布特征进行探究影响物料悬浮因素的探究。

4 区间浓度方差作用规律

各搅拌机制对应的轴向区间浓度方差 σ_1^2 见表3。因数据分析需要,在此仅列出 $z/H = 0.90$ 以及 $z/H = 0.15$ 两个轴向特征位置的区间浓度方差。

表3 典型搅拌机制各轴向区间浓度方差

Table 3 Axial interval concentration variance of typical stirred mechanism

搅拌机制	σ_1^2									
	-0.500+0.250 mm		-0.250+0.175 mm		-0.175+0.125 mm		-0.125+0.074 mm		-0.074+0.045 mm	
	$z/H=0.90$	$z/H=0.15$	$z/H=0.90$	$z/H=0.15$	$z/H=0.90$	$z/H=0.15$	$z/H=0.90$	$z/H=0.15$	$z/H=0.90$	$z/H=0.15$
4PBDT	0.988 4	0.260 6	0.965 7	0.133 7	0.955 6	0.045 63	0.536 8	0.005 150	0.416 5	0.002 194
4DBT	0.984 4	0.695 6	0.954 3	0.615 8	0.941 1	0.519 90	0.486 8	0.015 120	0.394 0	0.007 312
4PBDT+导流筒	0.984 1	0.350 5	0.953 1	0.223 9	0.939 5	0.106 50	0.370 1	0.007 683	0.252 0	0.002 742
4DBT+挡板	0.988 7	0.641 8	0.966 7	0.493 3	0.957 0	0.377 00	0.660 3	0.004 341	0.626 2	0.004 155

4.1 搅拌体系的离底悬浮能力

调浆作业最基本的要求是使矿物颗粒在液相中悬浮起来,槽底区间浓度方差 $\sigma_1^2(z/H=0.15)$ 即表征对应机制作用下使得物料实现离底悬浮的能力(即离底悬浮能力,简称为 JSC)大小。显然, $\sigma_1^2(z/H=0.15)$ 越小,则 JSC 越强。由表3分析可知, -0.500+0.250 mm 较粗物料悬浮过程对应的 $\sigma_1^2(z/H=0.15)$ 能更明晰的反映不同机制作用下的 JSC。由此比较各搅拌机制作用下的 JSC 由强到弱依次为: 4PBDT > 4PBDT + 导流筒 > 4DBT + 挡板 > 4DBT。

轴流式流场的 JSC 优于径流式流场;添加导流筒使得 JSC 略有降低;添加挡板则使得 JSC 得以强化。

4.2 搅拌机制的有效作用范围

表3中高液位 σ_1^2 出现迅速增大的现象,说明各搅拌机制沿轴向存在一个作用范围,超过此范围,作用效果大幅衰减。则定义该范围为搅拌机制的有效作用范围(Effective Range,简称 ER)。物料悬浮过程在宏观上属于传质过程,由此 ER 限制了物料在高液位的传质效率。

参考控制系统中衡量震荡过程衰减程度的衰减

比的概念(在对控制系统性能的评价中,衰减比等于两个相邻同向波峰值之比),定义传质效率衰减比为

$$p' = \sigma_1^2 / \sigma_1^1 \quad (1)$$

式中, σ_1^2 为高液位的区间浓度方差; σ_1^1 为低液位的区间浓度方差。

传质效率衰减比 p' 反映的即是轴向浓度梯度的变化,其意义为浓度方差增加的幅度。

取 $\sigma_1^2 = \sigma_1^2(z/H=0.90)$, $\sigma_1^1 = \sigma_1^2(z/H=0.15)$, 代入式(1)计算得到各搅拌机制对应的 p' 见表4。在物料粒度较粗时因整体悬浮水平较低,不能实现质量有效的传递,其传质效率特征表现不明显。因此只有当槽内物料达到一定悬浮水平时,对传质效率的评价才有意义。综上分析,可得出 ER 的评判准则:在槽内物料达到一定的悬浮水平时, JSC 相当的前提下, p' 值越小, ER 越大。则结合表3、4 可得不同机制下 ER 的大小顺序为: 4DBT > 4PBDT; 4PBDT + 导流筒 > 4PBDT; 4DBT > 4DBT + 挡板。

同样条件下径流式流场的 ER 较轴流式流场存在明显的优势。导流筒的添加使 ER 得以扩大;添加挡板则使得物料较难循环至高液位, ER 大大减小。

表 4 典型搅拌机制对应的传质效率衰减比
Table 4 Mass transfer efficiency attenuation ratio
of typical stirred mechanism

物料粒 级/mm	p'			
	4PBDT	4DBT	4PBDT+导流筒	4DBT+挡板
-0.500+0.250	3.79	1.42	2.81	1.54
-0.250+0.175	7.22	1.55	4.26	1.96
-0.175+0.125	20.94	1.81	8.82	2.54
-0.125+0.074	104.23	32.20	48.17	152.11
-0.074+0.045	189.84	53.88	91.90	150.71

5 搅拌体系的悬浮能力解析

综合 JSC、ER 的影响可以实现对搅拌体系悬浮能力差异的解析。

5.1 -0.500+0.125 mm 较粗物料的悬浮过程

物料粒度较粗,整体悬浮水平较低,只有实现有效离底悬浮,才有机会参与向高液位的传质过程,则此时悬浮能力主要由 JSC 决定。在实现较好离底悬浮的前提下,ER 成为决定整体悬浮能力的控制因素。

5.2 -0.125+0.045 mm 细粒物料的悬浮过程

细粒物料的悬浮过程中,槽内物料悬浮水平较高,槽底区域基本接近或处于均匀悬浮的状态($\sigma_1^2(z/H=0.15)=0.01$),此时 JSC 的差异对整体悬浮能力的影响已不再是主要因素。此时决定悬浮能力的主要因素为 ER。

6 结 论

(1)各搅拌机制下,调浆搅拌槽内物料的悬浮水平主要沿轴向衰减。在不添加挡板的条件下,沿切向不存在明显的浓度递变规律;添加挡板后的液面附近槽壁区域,挡板后的物料浓度略低于挡板之前的物料浓度。

(2)以 $\sigma_1^2(z/H=0.15)$ 与传质效率衰减比 p' 为特性参数定制了离底悬浮能力与有效作用范围的评价标准。物料要实现悬浮,对应搅拌体系具备足够的 JSC 是先决条件;较大的 ER 是提高整体传质效率、实现物料均匀悬浮的必要条件。

(3)由于受测量手段的限制以及工况的复杂性,进一步的研究工作仍需完善。

参考文献:

[1] 岳冠周,伍喜庆,王毓华,等.近年浮选进展[J].金属矿山,2006(1):41-50.
Yue Guanzhou, Wu Xiqing, Wang Yuhua, et al. Advance in flotation in recent years[J]. Metal Mine, 2006(1):41-50.
[2] 朱建光.2008 年浮选药剂的进展[J].国外金属矿选矿,2009(S1):2-8.

Zhu Jianguang. Advance in flotation reagents in 2008 [J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2009(S1):2-8.
[3] 王永田,张明青,刘炯天.分形理论在难沉降煤泥水澄清药剂选择中的应用[J].煤炭学报,2010,35(12):2116-2120.
Wang Yongtian, Zhang Mingqing, Liu Jiongtian. Application of fractal theory on flocculant choice of difficult clarified coal slurry[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12):2116-2120.
[4] 康文泽,王慧,胡军.超声处理煤泥与浮选药剂的作用研究[J].煤炭学报,2006,31(6):804-807.
Kang Wenze, Wang Hui, Hu Jun. Study of effect of slime processed by ultrasonic on flotation reagent[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(6):804-807.
[5] 李振,刘炯天,王永田,等.浮选技术的发展现状及展望[J].金属矿山,2008(1):1-6.
Li Zhen, Liu Jiongtian, Wang Yongtian, et al. Development actuality and prospect of flotation technology[J]. Metal Mine, 2008(1):1-6.
[6] 罗仙平,陈江安,熊淑华.近代化学选矿技术进展[J].四川有色金属,2006(2):9-17.
Luo Xianping, Chen Jiang'an, Xiong Shuhua. Research process of chemical extraction technology[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2006(2):9-17.
[7] 李振,刘炯天,曹亦俊,等.浮选调浆技术评析[J].矿山机械,2009,37(23):98-103.
Li Zhen, Liu Jiongtian, Cao Yijun, et al. The review of pulp-mixing technique of flotation [J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37(23):98-103.
[8] 李振,刘炯天,曹亦俊.浮选过程搅拌调浆技术评述[J].金属矿山,2009(10):5-11.
Li Zhen, Liu Jiongtian, Cao Yijun. Review of stirred pulp-mixing technology in flotation process[J]. Metal Mine, 2009(10):5-11.
[9] 尚旭,张文彬,刘殿文,等.微细粒矿物的分选技术及设备探讨[J].矿产保护与利用,2007(1):31-35.
Shang Xu, Zhang Wenbin, Liu Dianwen, et al. The discussion on beneficiation technologies and equipments for minuteness minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2007(1):31-35.
[10] 皮斯 J D. 提高细粒矿物回收率的浮选流程设计[J].国外金属矿选矿,2006(9):29-36.
Pease J D. Flotation process design of improving fine ores recovery [J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2006(9):29-36.
[11] 丁兆阳,张智,滕婷婷.微细粒煤分选特性及其浮选技术进展[J].山东煤炭科技,2008(6):65-66.
Ding Zhaoyang, Zhang Zhi, Teng Tingting. The separation of micro-pea coal and technical progress of its flotation technology [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2008(6):65-66.
[12] 内格里·T,张莉娜,李长根.浮选矿浆调浆强度的测定和按比例放大[J].国外金属矿选矿,2007(4):22-25.
Negri T, Zhang Lina, Li Changgen. Determination of flotation pulp mixing strength and proportional scaling up [J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2007(4):22-25.
[13] 佟立军.机械搅拌槽挡板的研究[J].有色设备,2005(3):17-19.
Tong Lijun. Study on baffle in mechanical agitating tank [J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment, 2005(3):17-19.