

文章编号:0253-9993(2013)01-0140-05

## 调浆剪切强度对煤泥浮选的影响

马力强,韦鲁滨,江兴华,赵晓勇,陈清如

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

**摘要:**以开滦钱家营炼焦煤选煤厂的煤泥为样品,在对原煤泥、 $>0.074$  mm 为主的粗煤泥、 $<0.074$  mm 为主的细煤泥等煤样进行实验室调浆试验的基础上,利用自行研制的新型调浆机完成了  $35\text{ m}^3/\text{h}$  负荷的半工业性试验,重点考察调浆机叶轮线速度对浮选可燃体回收率的影响。结果表明:在实验室、半工业性规模的煤泥调浆试验中,均存在适宜的调浆剪切强度,不足或过度调浆都不利于提高可燃体回收率;实验室试验中对原煤泥、 $>0.074$  mm 为主的粗煤泥,优化的调浆叶轮线速度相似,均为  $6.00\text{ m/s}$ ,对 $<0.074$  mm 为主的细煤泥,优化的调浆叶轮线速度为  $2.33\text{ m/s}$ ;对半工业性试验中采用的新型煤泥调浆机,叶轮线速度在  $5\sim 8\text{ m/s}$  时可获得较好的调浆效果,浮选可燃体回收率比矿浆预处理器平均提高  $9.65$  百分点。

**关键词:**调浆;煤泥;浮选;叶轮线速度;可燃体回收率

**中图分类号:**TD943.2 **文献标志码:**A

## Effects of shearing strength in slurry conditioning on coal slime flotation

MA Li-qiang, WEI Lu-bin, JIANG Xing-hua, ZHAO Xiao-yong, CHEN Qing-ru

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** The coal slime samples from Qianjiaying Coking Coal Preparation Plant of Kailuan Mining Group were used in the experimental study on the effects of shearing strength in slurry conditioning on coal slime flotation. The raw coal slime, coarse coal slime with grain size greater than  $0.074\text{ mm}$  and fine coal slime with grain size less than  $0.074\text{ mm}$  were tested with different shearing strengths. Based on above laboratory test, a pilot experiment was conducted at the Qianjiaying Coking Coal Preparation Plant using a newly designed slurry conditioning machine with  $35\text{ m}^3/\text{h}$  capacity. The results show that the suitable shearing strengths could be selected in slurry conditioning processes either on a laboratory scale or in a pilot experiment. Otherwise, inadequate or excessive conditioning strength will result in the decrease of combustibles recovery. The optimized impeller linear speeds for conditioning of raw coal slime are similar, which is  $6\text{ m/s}$  on average, and  $2.33\text{ m/s}$  for the fine coal slime with the grain size less than  $0.074\text{ mm}$ . The suitable impeller linear speed of the new slurry conditioning machine used in pilot experiment covers the range between  $5\sim 8\text{ m/s}$ . Compared with the existing coal slurry conditioning equipment, the new slurry conditioning machine can increase the combustibles recovery by  $9.65$  percents in a pilot experiment.

**Key words:** slurry conditioning; coal slime; flotation; impeller linear speed; combustibles recovery

随着入浮煤泥粒度的普遍下降,煤泥浮选的难度逐渐加大。在完善浮选设备及工艺、提高浮选效率方面,国内外学者和工程技术人员开展了深入、细致的研究工作,浮选设备呈现多样化的发展趋势,如维姆

科浮选机、充填式浮选机、CGF型粗粒浮选机、喷射浮选机、XJM-S系列大型机械搅拌式浮选机,以及引入了复合力场的旋流静态微泡浮选柱为代表的各种柱式分选设备等<sup>[1-8]</sup>,但这些设备普遍存在煤质适

收稿日期:2012-03-09 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)资助项目(2007AA05Z339);国家自然科学基金资助项目(51174214);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214900)

作者简介:马力强(1963—),男,辽宁东港人,副教授,博士。Tel:010-62331538, E-mail:mlqiang@sina.com

应性不强,回收率、分选精度不能兼顾的缺陷,细粒煤的分选难题目前仍然没有得到很好地解决<sup>[9]</sup>。

煤泥调浆是煤泥浮选工艺中的一个重要环节,其作用不仅仅是物料的均匀搅拌,而是要在高剪切力作用下促进浮选捕收剂的分散,提高捕收剂油滴与煤泥颗粒的碰撞概率和有效吸附概率,起到煤泥表面改质的作用,为浮选做好准备。迄今,国内外研究人员对矿浆预处理重要性的认识逐步提高,也相继提出了一些新方法,开发了一些新的矿浆预处理设备,如射流式预矿化器、跌落箱混合器、管道混合器、表面改质机等<sup>[10-16]</sup>,然而,这些方法和设备在取得一些成效的同时,难以全面满足细粒煤所特有的高分散、高效碰撞接触的要求,调浆效果仍然不够理想。究其原因,是对煤泥调浆过程的物理、物理化学本质及其规律缺乏深入、准确的解析和把握。

本文在对煤泥调浆机理进行理论分析的基础上,选用我国典型炼焦煤煤泥作为研究对象,利用自行设计、研制的新型调浆设备研究调浆剪切强度影响煤泥浮选效果的规律,以期对优化浮选工艺参数,高效、经济地回收宝贵的炼焦煤资源提供理论参考。

## 1 煤泥调浆机理

煤泥调浆煤泥浮选前重要的预处理环节,它是通过强烈的机械搅拌引起液流强湍流运动,在一定的时间和高剪切条件下,捕收剂油滴和矿物颗粒聚团被分散成更小的粒级,相间接触面积增大,使煤泥与油滴颗粒发生碰撞、吸附,从而改变煤泥的可浮性。

剪切强度和调浆时间是调浆强度的两个重要参数。通过实验可以知道,在调浆搅拌过程中,通过改变调浆强度可提高捕收剂的分散度,即随着剪切强度的提高,捕收剂被分散得越来越细<sup>[17]</sup>。

根据德国著名两相流学者 Sommerfeld 颗粒碰撞理论<sup>[18]</sup>,可以推导出:当颗粒分散后,颗粒间的理论碰撞概率增加,即,在调浆搅拌的过程中,增加剪切力,可以提高捕收剂的分散程度,捕收剂与煤泥颗粒的理论碰撞概率将大幅增加<sup>[17,19]</sup>。

捕收剂与煤泥颗粒实际发生的碰撞概率远小于理论计算的碰撞概率。在实际剪切流场中,流体力、范德华力、静电力等因素都影响颗粒的碰撞概率。正是在这些力的作用下,捕收剂与煤泥颗粒在靠近过程中可能产生绕流现象。刘焕芳等<sup>[20]</sup>通过研究泥沙圆柱绕流发现,当圆柱直径与泥沙粒径之比越大,绕流概率(无沙区区域)越大,绕流概率随水流速度的增加而减小。李向阳等<sup>[21]</sup>通过对气固两相流体中煤粉颗粒间相互作用研究中发现,随着煤粉颗粒粒径从

300  $\mu\text{m}$  减小到 10  $\mu\text{m}$ ,其受气体流场的影响逐步增大,即绕流概率逐步增大。

对于浮选煤泥矿浆体系来说,油滴颗粒较大( $>10 \mu\text{m}$ )时具有较大的惯性,容易保持原有运动方向与煤泥颗粒发生碰撞而不易随流体绕流;随着油滴逐步减小( $<10 \mu\text{m}$ ),在流体发生绕流时,油滴自身惯性小,油滴与煤粒都带负电荷<sup>[22]</sup>,静电排斥力作用逐步增强,较易随流绕过煤粒而不与之发生碰撞<sup>[17]</sup>。

但捕收剂油滴和煤泥颗粒的碰撞并不能确保发生进入浮选阶段的有效吸附。在煤泥浮选工艺中多采用的煤油、柴油都属于非极性烃类油,其在煤泥颗粒上的吸附主要是结合力较弱的物理吸附<sup>[23]</sup>。物理吸附是可逆的,捕收剂从煤泥颗粒表面解吸的概率随剪切力的增大而增大。按粒度来说,粒度越小,附着力量越大,越不容易解吸<sup>[24]</sup>。

捕收剂与煤泥颗粒能否发生有效吸附,还要看理论碰撞概率、绕流概率、解吸概率之间的“博弈”,并最终影响到浮选精煤的产率和质量。因此,对于煤泥调浆工艺来说,提高调浆强度是确保浮选精煤回收率和质量的关键,但由于绕流和解吸概率的影响,过度调浆对提高精煤产率却是不利的。

## 2 煤泥调浆和浮选实验

### 2.1 试验煤样

试验煤样选用开滦集团钱家营选煤厂煤泥。开滦矿区是我国重要的炼焦煤产地,其煤泥粒度组成细、可浮性差,一般需采用二段粗、精浮选工艺才能得到合格精煤产品,具有典型性。

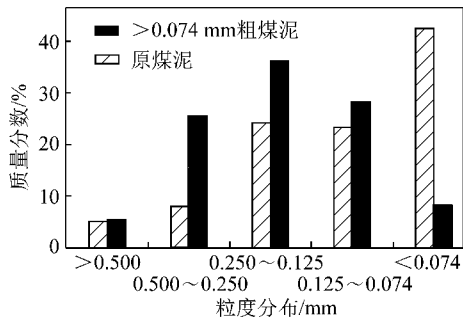
为进一步考察调浆对不同粒度组成煤泥的影响,对原煤泥进行 0.074 mm 分级处理,得到粗、细两种煤泥产物,对这两部分煤泥分别进行调浆实验。对原煤泥及分级后煤泥样进行粒度组成分析,分析结果如图 1 所示。

从图 1 可以看出:原煤泥样中,0.500 ~ 0.074 mm 的粒级占 53.81%, $<0.074 \text{ mm}$  细粒煤泥占 41.3%;粗煤泥样中,0.500 ~ 0.074 mm 粒级占 86.96%;细煤泥样中, $<50 \mu\text{m}$  粒级占 67.14%。

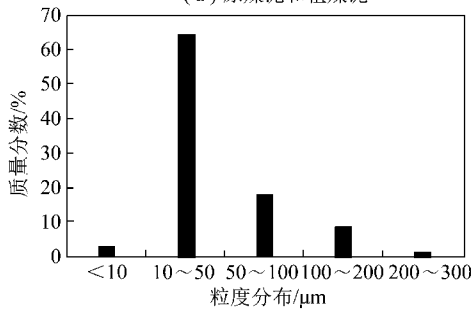
### 2.2 装置及方法

实验室调浆试验采用的是自制 5 级转速搅拌器。搅拌器容量 1 L,搅拌叶轮形式为是斜叶开启涡轮式。叶轮线速度是表征搅拌过程剪切强度的重要指标,也是搅拌器放大的基准指标之一,实验采用叶轮线速度指标作为剪切强度指标。叶轮线速度具 5 级可调,分别为 1.63, 2.28, 4.14, 5.90, 8.23 m/s。

对原煤泥、粗、细粒级煤泥分别进行不同转速下



(a) 原煤泥和粗煤泥



(b) 细煤泥

图 1 原煤泥,筛分粗煤泥和细煤泥粒度分布

Fig. 1 Size distribution of raw slime, coarse slime and fine slime fractions

的调浆搅拌,调浆时间均为 2 min,通过浮选试验可燃体回收率的变化考察调浆效果。浮选试验选用柴油、仲辛醇作为捕收剂和起泡剂,捕收剂用量为 300 ~ 600 g/t,起泡剂用量为 20 ~ 100 g/t。

半工业性调浆试验利用自行研制的 BGT-800 型的高效调浆机(图 2)进行调浆。BGT-800 高效调浆机直径 800 mm,有效容积 0.5 m<sup>3</sup>,功率 11 kW,叶轮形式为涡轮式,采用三段立式搅拌。

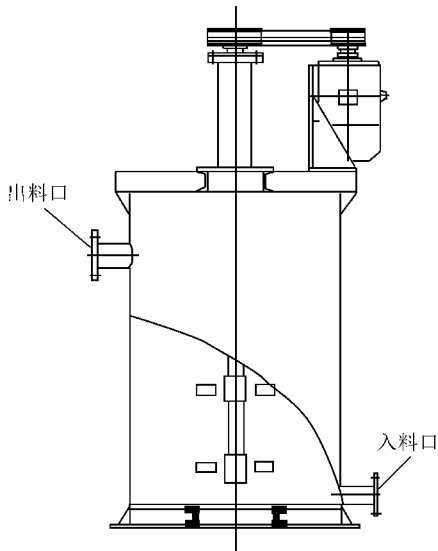


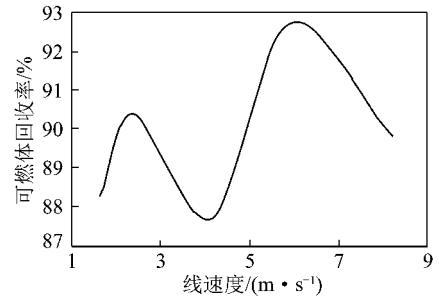
图 2 BGT-800 型高效调浆机

Fig. 2 Schematic drawing of BGT-800 slurry conditioning machine

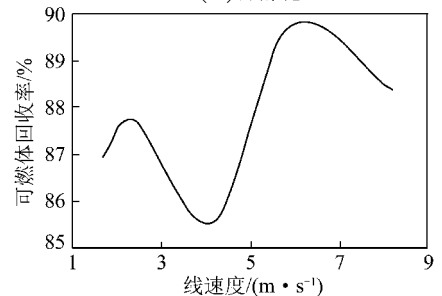
从钱家营选煤厂浮选生产系统中引旁路分出 35 m<sup>3</sup>/h 矿浆进入半工业调浆试验系统,通过调整变频器改变调浆机转速进行调浆。调浆后取样做小浮选试验,测定可燃体回收率。另外,同时从原生产系统中的矿浆预处理器取样做小浮选试验,测定可燃体回收率,对比两个装置调浆效果。

### 3 结果与讨论

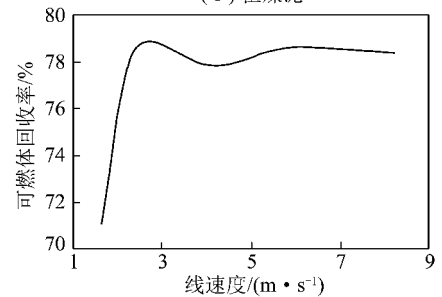
实验室对原煤泥、粗粒级煤泥、细粒级煤泥调浆试验结果如图 3 所示,半工业性调浆试验结果如表 1、图 4 所示。



(a) 原煤泥



(b) 粗煤泥



(c) 细煤泥

图 3 煤泥调浆叶轮线速度对可燃体回收率的影响

Fig. 3 Effect of stirring impeller speed in slurry conditioning of raw coal slime, coarse slime and fine slime on combustible material recovery

由图 3(a)可知,在原煤泥调浆试验中,当叶轮线速度由 1.63 m/s 提高到 2.28 m/s 时,捕收剂油滴与煤粒碰撞概率提高,可燃体回收率随之增加;当叶轮线速度由 2.28 m/s 提高到 4.14 m/s 时,虽然捕收剂油滴与煤粒理论碰撞概率增加,但随着捕收剂油滴进一步分散,绕流概率也增加,造成微细油滴与煤泥颗



表1 半工业性试验中叶轮线速度对可燃体回收率的影响

Table 1 Effect of stirring parallel speed on flotation and combustible yield in pilot experiment

叶轮线速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	精煤产率/%	精煤灰分/%	可燃体回 收率/%
5.65	60.73	12.51	71.65
6.59	58.33	12.17	69.08
7.54	61.72	12.71	72.65
8.48	52.99	12.34	62.64
平均	58.44	12.43	69.01
原系统矿浆预处理器	50.66	13.11	59.36

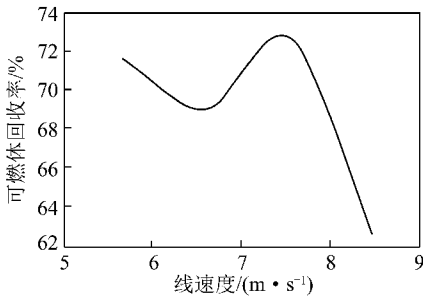


图4 半工业性调浆试验叶轮线速度对可燃体回收率的影响

Fig. 4 Effect of stirring impeller speed of conditioning machine in pilot experiment on combustible material recovery

粒发生碰撞的概率下降,所以可燃体回收率略有下降;再进一步增大叶轮线速度,油滴获得的动能增加,增加到易突破静电势垒的程度,则会减弱绕流效应,颗粒碰撞概率增加;当叶轮线速度由  $4.14 \text{ m/s}$  提高到  $5.90 \text{ m/s}$  时,得到试验中最大的可燃体回收率  $92.73\%$ ;在过度调浆条件下,已吸附到煤泥颗粒上的捕收剂在过强剪切作用下容易发生解吸,因此,叶轮线速度超过  $5.90 \text{ m/s}$  后,可燃体回收率下降。

在图3(b)可知,在粗煤泥调浆试验中,可燃体回收率随调浆强度的变化与原煤泥类似,具有相同的变化规律。当叶轮线速度为  $5.90 \text{ m/s}$  时,也得到试验最大的可燃体回收率  $89.78\%$ 。但对于细粒级煤泥调浆试验图3(c),却有较大不同:当叶轮线速度由  $1.63 \text{ m/s}$  增加到  $2.38 \text{ m/s}$  后,可燃体回收率从  $70.99\%$  大幅度提高到  $78.50\%$ ;此后,可燃体回收率基本稳定,这是因为油滴对于细粒级煤泥绕流效应明显弱于粗粒级煤泥,进一步验证了颗粒间相对尺寸越大,绕流效应越强。另外,也说明细粒级对捕收剂吸附力强,不容易解吸。

由实验室调浆试验结果的分析可以看出,在分散度、碰撞概率、绕流概率、解吸概率等因素的共同作用下,调浆剪切强度对煤泥浮选效果有很大影响。同

时,剪切强度对不同粒度组成煤泥有不同的影响效果,或者说,粒度组成不同时,需要不同的调浆参数与之相适应。对于普通煤泥,或以  $>0.074 \text{ mm}$  粒度为主的粗粒级煤泥,浮选效果受调浆剪切强度影响较大,叶轮线速度为  $6.00 \text{ m/s}$  左右时,可取得较高的可燃体回收率;当煤泥粒度组成是以  $<0.074 \text{ mm}$  为主的细粒级煤泥时,叶轮线速度大于  $2.33 \text{ m/s}$  以后,调浆剪切强度对浮选效果影响较小。

由图4可知,可燃体回收率同样随剪切强度的提高而变化:当叶轮线速度从  $5.65 \text{ m/s}$  提高到  $8.48 \text{ m/s}$  时,可燃体回收率在  $69.08\% \sim 72.65\%$  小幅波动;当线速度达到  $8.48 \text{ m/s}$  后,受绕流、解吸效应影响,可燃体回收率大幅下降至  $62.64\%$ 。其变化规律与实验室试验结果略有不同的主要原因是两种装置的结构不同及放大效应。与原生产系统矿浆预处理器相比(表1),可燃体回收率平均提高  $9.65$  百分点,说明高效调浆机对浮选煤泥预处理得更加充分。

## 4 结 论

(1) 捕收剂与煤泥颗粒间的有效吸附概率受到颗粒理论碰撞概率、颗粒绕流概率以及吸附后解吸概率的共同影响。

(2) 调浆剪切强度是影响浮选效果的重要因素,通过改变搅拌叶轮线速度来调控调浆设备的剪切强度,可以大幅度改善浮选效果;但存在适宜的调浆剪切强度,不足或过度调浆都不利于提高可燃体回收率。

(3) 对于 BGT-800 型工业煤泥高效调浆设备,叶轮线速度在  $5 \sim 8 \text{ m/s}$  时可获得较好的调浆效果。在实验室调浆研究和半工业性实验中获得了叶轮剪切强度影响浮选的一致性规律。

(4) 半工业试验结果表明,高效调浆机对浮选煤泥预处理得更加充分;经高效调浆机调浆处理后,浮选可燃体回收率比矿浆预处理器提高  $9.65$  百分点。

## 参考文献:

- [1] 梁金钢,赵环帅,何建新.国内外选煤技术与装备现状及发展趋势[J].选煤技术,2008(1):60-64,76.  
Liang Jingang, Zhao Huanshuai, He Jianxin. Current status and development trends of coal preparation technology and equipment both in domestic and overseas [J]. Coal Preparation Technology, 2008 (1): 60-64, 76.
- [2] 刘峰.重介质旋流器选煤技术的现状及在我国的新发展[J].选煤技术,2004(4):1-8.  
Liu Feng. State-of-art of coal washing with dense medium cyclone and its recent development in China [J]. Coal Preparation Technology, 2004(4): 1-8.

- [3] 刘炯天. 旋流-静态微泡柱分选方法及应用[J]. 选煤技术, 2000(2):1-5.  
Liu Jiongtian. The separation method of cyclone-static microbubble column flotation and practical application [J]. Coal Preparation Technology, 2000(2):1-5.
- [4] Graeme J Jameson. New directions in flotation machine design[J]. Minerals Engineering, 2010, 23:835-841.
- [5] Shirley C Tsaia. Effects of surface chemistry and particle size and density on froth flotation of fine coal [J]. Colloids and Surfaces, 1985, 16(3-4):323-336.
- [6] Paul A Harvey, Anh V Nguyen, Geoffrey M Evans. Influence of electrical double-layer interaction on coal flotation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2002, 250:337-343.
- [7] Heiskanen K. On the relationship between flotation rate and bubble surface area flux[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(2):141-149.
- [8] Sripriya P V T Rao R, Choudhury B Roy. Optimisation of operating variables of fine coal flotation using a combination of modified flotation parameters and statistical techniques [J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 68:109-127.
- [9] 戴少康. 选煤工艺设计实用技术手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2010:471.  
Dai Shaokang. Coal preparation technology and design of practical technical manual [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010:471.
- [10] Hiroshi Yamazaki, Kakuji Tojo, Kei Miyunami. Effect of power consumption on solids concentration profiles in a slurry mixing tank [J]. Powder Technology, 1991, 64(3):199-206.
- [11] Engel M D, Middlebrook, Jameson G J. Advances in the study of high intensity conditioning as-a means of improving mineral flotation performance[J]. Minerals Engineering, 1997, 10(1):55-68.
- [12] 程宏志, 路迈西, 石 焕, 等. 振荡法提高浮选选择性的作用机理[J]. 煤炭学报, 2007, 32(5):531-534.  
Cheng Hongzhi, Lu Maixi, Shi Huan, et al. The mechanism of oscillating flotation to improve selectivity[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5):531-534.
- [13] 曹 亮, 陈 东, 张文明, 等. 一种粗颗粒机械搅拌式浮选机的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2007(4):26-28.  
Cao Liang, Chen Dong, Zhang Wenming, et al. Study on a kind of mechanical flotation mechine for coarse particles[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2007(4):26-28.
- [14] 高 丰. 粗煤泥分选方法探讨[J]. 选煤技术, 2006(3):40-42.  
Gao Feng. An approach to coarse coal slime separation [J]. Coal Preparation Technology, 2006(3):40-42.
- [15] 边炳鑫, 陈清如, 韦鲁滨. 浮选矿浆的磁化处理效应和机理研究 [J]. 煤炭学报, 2004, 29(1):97-100.  
Bian Bingxin, Chen Qingru, Wei Lubin. Study on flotation pulp's magnetization effect and mechanism [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(1):97-100.
- [16] 胡 军, 王淀佐, 胡永平. 药剂与超声波处理的选煤方法研究 [J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(2):186-189.  
Hu Jun, Wang Dianzuo, Hu Yongping. Research on coal flotation by coaction of reagents and ultrasonic wave treatment [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(2):186-189.
- [17] 马力强. 煤泥浮选高效调浆方法及机理研究 [D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2011.  
Ma Liqiang. Novel technique and mechanism of slurry conditioning for coal slime flotation [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2011.
- [18] Sommerfeld M, Zivkovic G. Recent advances in the numerical simulation of pneumatic conveying through pipe systems [M]. London: Ch. Hirsch Ed. Elsevier Science Publishers S. V, 1992:201-212.
- [19] 马力强, 韦鲁滨, 李吉辉, 等. 煤泥高效调浆理论研究与应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(2):315-320.  
Ma liqiang, Wei Lubin, Li Jihui, et al. Theoretical study and application of efficient coal slurry conditioning [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2):315-320.
- [20] 刘焕芳, 文 辉, 李 强. 床面固体颗粒的圆柱绕流研究 [J]. 石河子大学学报(自然科学版), 1997, 1(2):155-158.  
Liu Huanfang, Wen Hui, Li Qiang. The study of particle at bottom in cylinder circulation flow [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 1997, 1(2):155-158.
- [21] 李向阳, 沈明忠, 张绪祯. 宽筛分煤粉颗粒间相互作用的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 1999, 20(1):111-115.  
Li Xiangyang, Shen Mingzhong, Zhang Xuyi. Numerical aimulation of interactions between various coal particles [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1999, 20(1):111-115.
- [22] 郭梦熊. 浮选 [M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1989:62-63.  
Guo Mengxiong. Flotation [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1989:62-63.
- [23] 张景来, 王启宝. 煤的界面化学及应用 [M]. 北京:中国建材工业出版社, 2001:11-20.  
Zhang Jinglai, Wang Qibao. Interfacial chemistry and application [M]. Beijing: China Building Materials Press, 2001:11-20.
- [24] 来蔚鹏, 薛永强, 庞先勇. 粒度对吸附影响的量子化学研究 [J]. 太原理工大学学报, 2005, 36(2):183-185.  
Lai Weipeng, Xue Yongqiang, Pang Xianyong. Study on effect of particle size on the adsorption by quantum chemistry method [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2005, 36(2):183-185.