

文章编号:0253-9993(2012)02-0301-09

# 异质细泥在煤泥浮选中的过程特征

桂夏辉<sup>1</sup>,程 敢<sup>2</sup>,刘炯天<sup>1</sup>,李树磊<sup>1</sup>,王永田<sup>1</sup>,曹亦俊<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 化工学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院,北京 100083)

**摘 要:**选择开滦矿区高灰难选煤泥试样进行浮选速度试验,对其5个精煤产品和高灰细粒级产品进行了粒度分析和密度分析,运用扫描电镜(SEM)观察了精煤产品的矿物形貌。结果表明:细泥污染存在于整个浮选过程中,J1,J2,J3,J4和J5五个子过程的高灰细泥占原煤的比例接近,但占各产品的比例逐渐升高;随着浮选的进行,高灰细泥(灰分>50%)的浮选速度下降,单位时间细泥的作业回收率降低;通过斯托克斯准数分析和扫描电镜观察,细泥主要是通过机械夹带和在粗粒煤表面罩盖进入精煤产品。

**关键词:**煤泥;浮选;过程特征;黏土;矿物形貌

中图分类号:TD923 文献标志码:A

## Process characteristics of heterogeneous fine mud in the coal flotation

GUI Xia-hui<sup>1</sup>,CHENG Gan<sup>2</sup>,LIU Jiong-tian<sup>1</sup>,LI Shu-lei<sup>1</sup>,WANG Yong-tian<sup>1</sup>,CAO Yi-jun<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology,China University of Mining & Technology,Xuzhou 221116,China;2. School of Chemical and Environmental Engineering,China University of Mining & Technology(Beijing),Beijing 100083,China)

**Abstract:** Processing objects is a kind of hard-to-float and high-ash fine coal which collected in Kailuan mining. Flotation rate experiment was designed for investigating the process characteristics of fine coal. Size analysis and density analysis of five cleans and fine-grained of the flotation rate experiment were studied. The mineral morphology of flotation rate experiment cleans was observed by scanning electron microscopy(SEM). The results show that fine mud contamination exists throughout the flotation process. The fine mud content in J1,J2,J3,J4 and J5 is similar, but gradually increases in its product. With the conduct of flotation, the flotation rate of high-ash fine mud(ash content> 50%) reduces, and the operation recovery of fine mud per unit time also reduce. Flotation rate and cumulative yield of heterogeneity fine mud increase with its size and density reducing. The way of high-ash fine mud into clean coal products is mechanical entrainment and covering the surface of coarse-grained coal by SEM and Stokes number( $St$ ) analysis.

**Key words:** fine mud; flotation; process characteristic; clay; mineral morphology

煤泥浮选过程中的异质细泥主要是细粒级黏土矿物以及黏土矿物遇水泥化所产生的微米级矿物质<sup>[1]</sup>,其矿物组成主要是黏土矿物、碳酸盐矿物、硫化物或氧化物等<sup>[2]</sup>。异质细泥对浮选过程的影响主要体现在对浮选精煤的污染<sup>[3]</sup>。

为减轻异质细泥对浮选的影响,国内外学者做了大量的试验研究。Shu Xinqian等<sup>[4]</sup>研究了通过改变黏土类矿物的表面性质,使其在矿浆中充分分散以减

少在矿化颗粒-气泡中的夹带。程宏志等<sup>[5]</sup>通过振荡浮选、选择性絮凝<sup>[6]</sup>、选择性聚团<sup>[7]</sup>等方法提高浮选选择性。崔广文等<sup>[8]</sup>通过实验室试验研究,认为细泥含量达到一定量时才能对浮选造成较大影响,且入浮粒级越宽时细泥的影响越明显。Jameson<sup>[9]</sup>认为细颗粒需要高能量状态的流体环境,通过强剪切和强紊流增加矿粒和气泡的碰撞附着概率,而粗颗粒的物料则只需较低的能量输入,但不同粒级都需要较高的

含气率来保证浮选效果。Seher Ata 等<sup>[10]</sup>研究表明泡沫对疏水矿粒的捕收效率很高,即浮选过程一方面受颗粒本身疏水性的影响很大,另一方面与泡沫中适于颗粒附着的表面积有很大关系。在长期的细粒级浮选动力学研究过程中,建立了如回收水量模型、 $<0.074$  mm 细泥含量与水量的模型、颗粒夹带等经验模型<sup>[11]</sup>,但很多模型都有局限性,难以真正描述浮选的机理,需要进一步研究<sup>[12-13]</sup>。在设备结构优化方面,周凌锋等<sup>[14-16]</sup>认为适合的矿浆扰动比静态浮选更有利于细粒浮选,王加强等<sup>[17]</sup>研究表明 FXZ 静态浮选柱较常规机械搅拌式浮选机对高灰细泥的选择性更好。在矿物形貌特征研究方面,张慧等<sup>[18-19]</sup>运用 SEM 分析了煤中难选矿物的形貌特征,并对煤中孔隙的成因和类型进行了研究。

关于异质细泥在浮选中的过程特征以及与之相对应的矿物形貌特征的研究较少,本文通过设计浮选速度试验,借助扫描电镜探索了异质细泥对浮选精煤污染的过程特点,对认识浮选过程和提高浮选精煤质量具有借鉴意义。

## 1 试 验

### 1.1 试验设备

浮选设备采用实验室型 XFD<sub>III</sub> 0.75L 充气搅拌

式浮选机,由外部气泵给气,并在浮选机搅拌轴上配备测量扭矩参数的 TQ-662 型传感器;矿物成分分析采用日本理学 D/Max-RA 型转靶 X 射线衍射仪;接触角测定采用德国 KRUSS 光学接触角测量仪 DSA100;样品的压片采用上海山岳科学仪器有限公司 YP-2 压片机;矿物形貌特征分析采用英国剑桥生产的 S250 型扫描电子显微镜(SEM)。

### 1.2 样品分析

试验煤样来源于唐山开滦矿区的浮选入料,煤种为肥煤,属于极难选煤泥。通过对煤样进行 X-射线衍射分析可知主要脉石矿物为高岭石,另外含有少量的石英、伊利石、黄铁矿、方解石、白云石等,高岭石遇水极易泥化而污染浮选精煤。

表 1 为该煤样的粒度组成,随着粒度的减小,灰分逐渐增大, $<0.045$  mm 细泥的灰分达到 27.08%,比 $>0.045$  mm 煤泥平均灰分高 8.13%,说明有大量的异质细泥混杂在细泥中,浮选时应注意细泥对精煤的污染问题。

对 $<0.074$  mm 粒级产品进行旋流水析试验(表 2)。 $<0.074$  mm 粒级中 $<0.010$  mm 的产率为 24.04%,灰分在 30% 以上,这部分微细颗粒的高灰部分极易混杂在精煤中,很难用浮选的手段将微细煤粒与异质细泥分开。

表 1 煤泥粒度分析数据

Table 1 Size analysis data of coal sample

粒度级/mm	产率	灰分	筛上累计		筛下累计		%
			产率	灰分	产率	灰分	
$>0.500$	3.19	16.25	3.19	16.25	100	20.31	
0.250~0.500	10.04	16.67	13.23	16.57	96.81	20.44	
0.125~0.250	30.12	17.79	43.35	17.42	86.77	20.88	
0.074~0.125	18.20	19.12	61.55	17.92	56.65	22.52	
0.045~0.074	21.72	21.85	83.27	18.95	38.45	24.13	
$<0.045$	16.73	27.08	100	20.31	16.73	27.08	
合计	100	20.31					

表 2 煤泥 $<0.074$  mm 旋流粒度分析试验结果

Table 2 Results of  $<0.074$  mm grading with cyclone partical size analyzer

粒度级/mm	产率/%	灰分	筛上累计		筛下累计		%
			产率	灰分	产率	灰分	
0.074~0.030	52.48	21.98	52.48	21.98	100	24.17	
0.030~0.020	9.08	28.50	61.56	22.94	47.52	26.60	
0.020~0.010	14.40	18.02	75.96	22.01	38.44	26.15	
$<0.010$	24.04	31.02	100	24.17	24.04	31.02	
合计	100	24.17					

由表 3 可知, <1.5 g/cm<sup>3</sup> 密度级产率为 74.31%, 灰分为 10.60%; >1.8 g/cm<sup>3</sup> 密度级的灰分为 65.99%, 说明该密度级应为大量已解离的异质矿物, 由粒度组成

可知其中异质细泥矿物比例较大; 以 1.5 g/cm<sup>3</sup> 为分选密度的 ±0.1 含量为 30.07% (可选性属于难选), 说明该煤样获得高产率的低灰精煤难度较大。

表 3 煤样密度分析数据  
Table 3 Density analysis of coal sample

密度级/ (g · cm <sup>-3</sup> )	产率/%	灰分/%	产率/%		灰分/%		δ±0.1 含量	
			浮物累积	沉物累积	浮物累积	沉物累积	密度级/(g · cm <sup>-3</sup> )	产率/%
<1.3	20.12	5.90	20.12	100	5.90	20.19	1.3	52.04
1.3~1.4	31.92	9.79	52.04	79.88	8.29	23.79	1.4	54.19
1.4~1.5	22.27	16.02	74.31	47.96	10.60	33.11	1.5	30.07
1.5~1.6	7.80	24.50	82.11	25.69	11.92	47.93	1.6	10.55
1.6~1.8	5.49	40.42	87.60	17.89	13.71	58.14	1.7	5.49
>1.8	12.40	65.99	100	12.40	20.19	65.99	1.8	15.15
合计	100	20.12						

1.3 试验方法

浮选速度试验流程为首先加入煤泥和蒸馏水润湿, 分散搅拌 120 s, 捕收剂接触搅拌 60 s, 起泡剂接触搅拌 10 s 后开始浮选刮泡, 第 1 次刮泡结束后其尾煤继续浮选刮泡, 直至结束。前 2 次的刮泡时间均为 30 s, 中间 2 次的刮泡时间各为 60 s, 最后 1 次刮泡时间为 120 s, 依次得到 J1, J2, J3, J4, J5 五种精煤产品和尾煤 W, 共 6 种浮选产品。由于样品筛分和浮沉对煤样的质量有一定的要求, 所以重复浮选速度试验 70 次, 以获取足够的产品。然后对上述 6 种产品分别进行粒度分析, 取 0.045~0.074 和 <0.045 mm 粒级的两种产品进行小浮沉试验, 考察高灰细泥在整个浮选过程中的分布。药剂用量等操作参数由条件试验探索确定, 捕收剂煤油用量为 320 g/t, 起泡剂仲辛醇用量为 110 g/t, 浮选入料矿浆质量浓度为 90 g/L, 充气量为 0.37 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · min), 浮选机叶轮转速为 1 800 r/min。

2 结果与讨论

2.1 煤泥的浮选速度试验

根据浮选速度各产品的粒度分析(图 1)可知, 各粒级均是低灰部分先浮出, 高灰部分后浮出。尾煤中的粗粒级产率明显高于细粒级产率, 特别是 >0.250 mm, 且尾煤中的粗粒级灰分不高, 仅在 20% 左右, 稍低于浮选入料灰分。同一粒级条件下, 从 J1 到尾煤 W, 灰分逐渐升高, 同一产品从粗粒级到细粒级, 灰分逐渐升高。各粒级条件下, 随着浮选的进行, J1~J5 的产率有递减趋势, J2 的产率低于 J1 和 J3, 主要是由于 J1 首先将大量的易浮物料浮出, 且 J2 的浮选时间只有 J3 的一半; 同时 J5 的产率低于 J4, 即随着浮选的进行, 物料的可浮性越来越差, 在相同的浮选条件下, 只有保证浮选时间才能回收到 J4, J5 等难浮精煤。

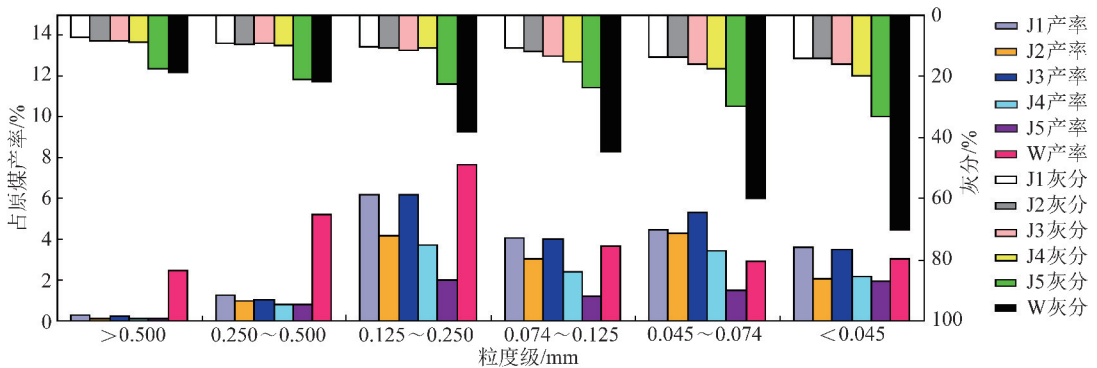


图 1 浮选速度试验产品的粒度分析

Fig. 1 Size analysis of flotation rate test product

在 <0.125 mm 的细粒级部分, J4 的灰分均超过了 15%, J5 的灰分均超过了 20%, 且远高于 J1, J2, J3

的灰分, 说明随着浮选的进行, 在浮选后期, 大量的高灰细颗粒部分上浮到精煤产品中, 这部分物料是以中

煤连生体为主还是以单体解离的异质细泥为主将会在产品的浮沉数据中分析,这部分高灰物料是如何上浮到 J4 和 J5 中,将会在 J4 和 J5 的扫描电镜图像中分析。

根据浮选速度试验产品的密度分析(图 2),不同产品中相同密度级的灰分接近,浮选前期低灰部分产

率高,但 J1, J2, J3, J4, J5 均有少量的灰分在 60% 以上的高灰部分分布在  $>1.8 \text{ g/cm}^3$  高密度级中,这部分应为异质细泥,同时在  $1.6 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$  密度级中同样分布着一定的灰分在 40% 以上的高灰产品,各精煤中  $1.6 \text{ g/cm}^3$  以上高灰部分占原煤的产率类似,说明异质细泥对精煤的污染存在于整个浮选过程。

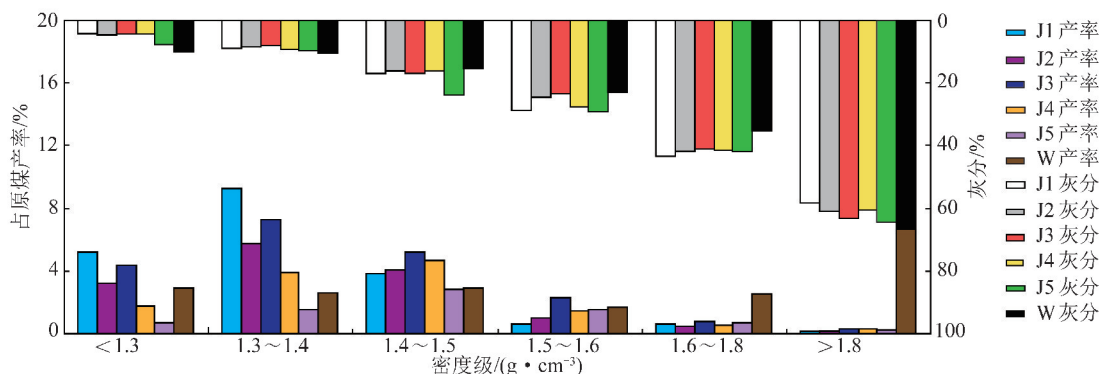


图 2 浮选速度试验产品的密度分析

Fig. 2 Density analysis of flotation rate test product

表 4 为  $1.6 \text{ g/cm}^3$  以上高灰部分占该产品的本级产率。随着浮选的进行,精煤中高灰部分占本级的产率越来越高, J5 中  $1.6 \text{ g/cm}^3$  以上密度级部分占该产品的 12.3%, 灰分为 47.32%, 在浮选初期, 矿浆浓度高, 精煤产率高, 极易形成细泥夹带或者罩盖, 在浮选后期, 浮选矿浆浓度降低, 低灰精煤已大量浮出, 加强矿浆溶液的分散对控制精煤质量有积极意义。

表 5 为细粒级部分占本产品的产率和灰分。 $<0.074 \text{ mm}$  粒级产率占各精煤产品的 40% ~ 45%, 随着浮选过程的进行, 细粒级的灰分逐渐升高; 特别是在 J5 中,  $<0.074 \text{ mm}$  粒级的灰分达到 31.66%, 且 J5 中  $>1.6 \text{ g/cm}^3$  密度级的含量达 12.30%、灰分为 47.32% (表 4), 细粒级精煤产品中有大量的高灰异质细泥。

表 4 高灰部分占本产品的产率和灰分

Table 4 Yield and ash of the high-ash part of the product

密度级/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	产率						灰分					
	J1	J2	J3	J4	J5	W	J1	J2	J3	J4	J5	W
1.6 ~ 1.8	3.29	3.26	3.70	4.34	9.29	10.18	43.31	41.81	40.99	41.46	41.86	35.20
>1.8	0.93	1.24	1.67	2.34	3.01	49.47	58.37	60.82	63.23	60.72	64.19	66.81
>1.6	4.22	4.50	5.37	6.68	12.30	59.65	46.63	47.05	47.91	48.21	47.32	61.42

表 5 细粒级部分占本产品的产率和灰分

Table 5 Yield and ash of the fine-grained level of the product

粒度级/mm	产率						灰分					
	J1	J2	J3	J4	J5	W	J1	J2	J3	J4	J5	W
0.045 ~ 0.074	22.54	29.16	26.17	27.18	19.80	11.77	13.79	13.80	15.98	17.51	29.86	60.04
<0.045	18.05	14.14	17.36	17.04	25.55	12.19	13.99	14.07	16.02	19.89	33.06	70.13
<0.074	40.59	43.30	43.53	44.22	45.35	23.96	13.88	13.89	16.00	18.43	31.66	65.17

## 2.2 细泥在浮选过程中的分布

将浮选速度的各个产品进行湿筛, 将  $0.045 \sim 0.074$  和  $<0.045 \text{ mm}$  两个细粒级产品进行密度分析。图 3 为  $0.045 \sim 0.074 \text{ mm}$  粒级浮选速度试验各产品

的的密度分析。该粒级的精煤产品以低密度级为主导, 随着密度的增加, 其占原煤的产率降低。低密度部分主要集中在 J1, J2 和 J3 中, 中间密度级主要集中在 J3 和 J4 中,  $>1.6 \text{ g/cm}^3$  的高密度级分布在各个

产品中,但 J5 中较少。

图 4 为 <0.045 mm 粒度浮选速度试验各产品的密度分析。该粒度级的精煤产品以 1.4 ~ 1.5 g/cm<sup>3</sup> 密度级为主导,>1.6 g/cm<sup>3</sup> 的高密度级均匀分布在各个产品中,且产率高于 0.045 ~ 0.074 mm 粒度。J5 中也含有大量的高灰产品。因 J1 产率高,J1 中的高灰细粒度占原煤含量高于其他产品,细粒度高灰部分随浮选的进行,其上浮至精煤产品中的累积产率和累积灰分如图 5 所示。可见,随着浮选的进行,精煤

累积灰分较为平稳,而高灰细粒度产品上浮量越来越大,细粒度高密度产品的累积灰分均在 50% 以上,<0.045 mm 粒度中>1.6 g/cm<sup>3</sup> 密度级产品的累积产率上升速度最快,而 0.045 ~ 0.074 mm 粒度中>1.8 g/cm<sup>3</sup> 密度级产品的累积产率上升速度较慢,特别在浮选后期,即浮选时间 180 s 以后,0.045 ~ 0.074 mm 粒度中>1.6 g/cm<sup>3</sup> 密度级产品几乎上浮量很小了。另外,灰分在 50% 以上的异质细泥,其粒度越细、密度越低、浮选速率越快,其累积产率越高。

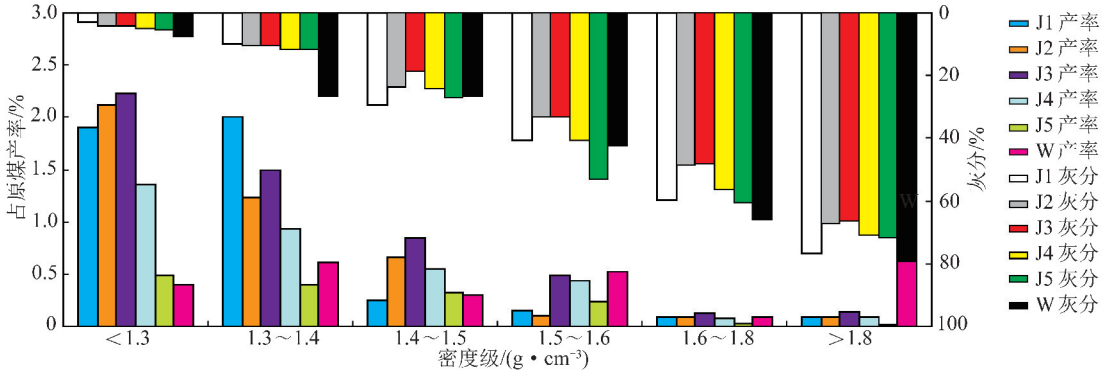


图 3 0.045 ~ 0.074 mm 粒度浮选速度试验产品的密度分析

Fig. 3 Density analysis of flotation rate test product of 0.045 ~ 0.074 mm

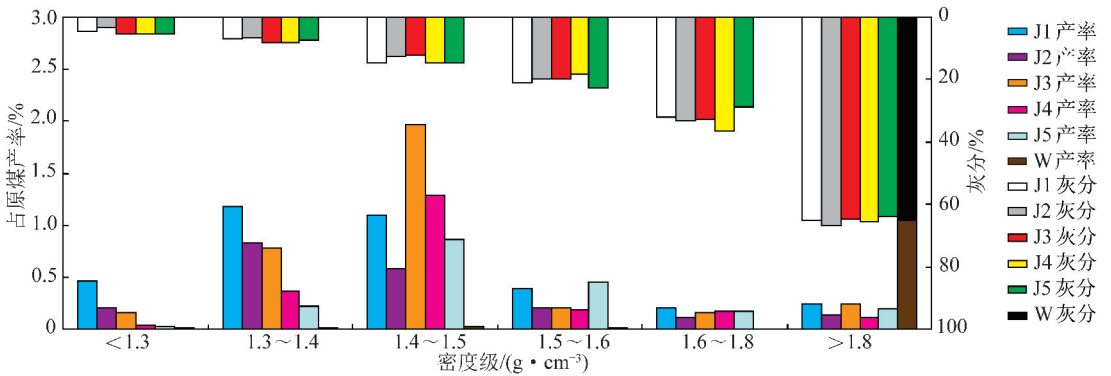


图 4 <0.045 mm 粒度浮选速度试验产品的密度分析

Fig. 4 Density analysis of flotation rate test product of <0.045 mm

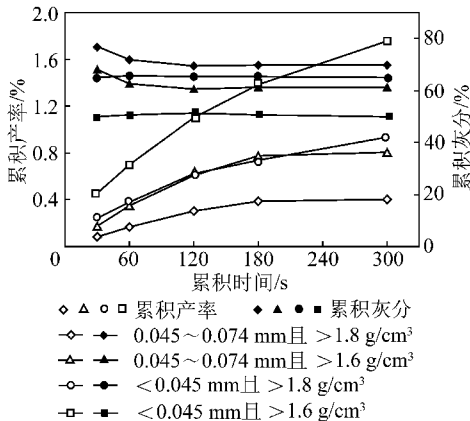


图 5 细粒度中高密度级产品在浮选过程中的分布

Fig. 5 Process characteristics of high-ash part in fine-grained level

随着浮选的进行,浮出产品的灰分逐渐增高,高灰产品所占的比例越来越大,细粒级的比例分布较均匀,细泥污染存在于整个浮选过程中;各精煤产品中,细泥污染占原煤的比例较为均匀,但针对本产品,随着浮选的进行细泥所占的比例越来越大。

以高灰异质细泥为研究对象(灰分在 50% 以上),将浮选速度试验分成 5 段作业,每段作业分别产生一个精煤产品,前一段作业的尾煤给入第 2 段作业作为原煤,此时假定 <0.045 mm 粒度中>1.6 g/cm<sup>3</sup> 密度级、<0.045 mm 粒度中>1.8 g/cm<sup>3</sup> 密度级、0.074 ~ 0.045 mm 粒度中>1.6 g/cm<sup>3</sup> 密度级、0.074 ~ 0.045 mm 粒度中>1.8 g/cm<sup>3</sup> 密度级 4 种产品为细泥产品,分别考察这 4 种异质细泥在浮选过程中的分布。

定义  $\gamma_i$  为第  $i$  次浮选精煤产品中细泥的占原煤的产率(表 6),  $\varepsilon_i$  为第  $i$  次浮选细泥的作业回收率,  $\varepsilon_i$  的计算方法如图 6 所示。为考察细泥回收率与浮选时间的关系, 定义  $\bar{\varepsilon}_{ii}$  为浮选细泥单位时间作业回收

率, 即

$$\bar{\varepsilon}_{ii} = \frac{\varepsilon_i}{\Delta t_i} \quad (1)$$

式中,  $\Delta t_i$  为第  $i$  次浮选作业的浮选时间, min。

表 6 4 种细泥占原煤的产率和灰分

Table 6 Yield and ash of four kinds of fine mud accounted for the raw

产品	占原煤产率				灰分			
	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4	条件 1	条件 2	条件 3	条件 4
J1	0.08	0.17	0.24	0.45	76.89	68.02	65.13	49.82
J2	0.09	0.18	0.14	0.25	67.16	57.56	66.96	52.02
J3	0.13	0.26	0.24	0.4	66.34	57.38	64.76	52.21
J4	0.09	0.16	0.11	0.28	70.88	64.09	65.53	48.02
J5	0.01	0.04	0.20	0.37	71.75	64.77	63.79	47.42
W	1.02	1.11	2.97	2.97	79.20	78.11	65.28	65.28

注: 条件 1 为 0.045 ~ 0.074 mm, > 1.8 g/cm<sup>3</sup>; 条件 2 为 0.045 ~ 0.074 mm, > 1.6 g/cm<sup>3</sup>; 条件 3 为 < 0.045 mm, > 1.8 g/cm<sup>3</sup>; 条件 4 为 < 0.045 mm, > 1.6 g/cm<sup>3</sup>。

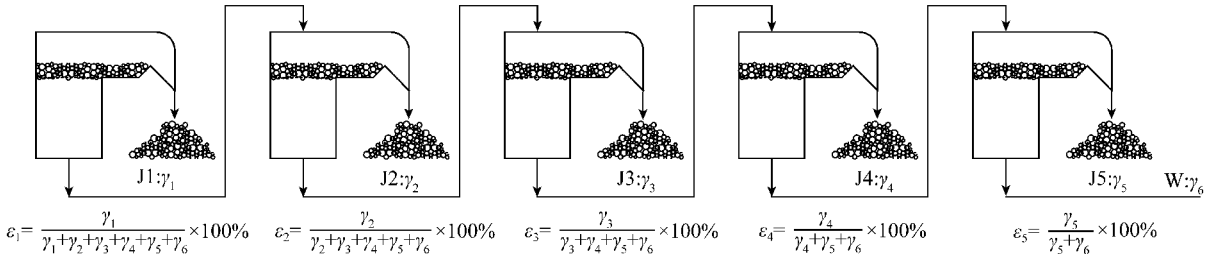


图 6 浮选速度试验作业示意

Fig. 6 Operation schematic diagram of the flotation rate experiment

图 7 为不同浮选精煤产品中浮选细泥单位时间作业回收率  $\bar{\varepsilon}_{ii}$  随浮选时间的变化关系。可知, 在浮选初期(J1, 0 ~ 0.5 min), 细粒级 (< 0.045 mm) 高灰细泥的单位时间作业回收率与粗粒级 (0.045 ~ 0.074 mm) 细泥相近; 在浮选中期 (J2 ~ J4, 0.5 ~ 3.0 min), 粗粒级高灰细泥的单位时间作业回收率明显高于细粒级细泥; 在浮选末期 (J5, 3.0 ~ 5.0 min), 其规律与中期相反。粗粒级细泥经过 J1 过程的浮选作用以后上浮速度加快, 在 J2 中粗粒级细泥的单位时间作业回收率最高, 随着浮选的进行, 所有细泥的单位时间作业回收率均降低。在浮选初期, 大量精煤上浮, 细泥被夹带的几率和罩盖粗粒煤表面的机会较高, 而在浮选后期, 精煤上浮量减少, 矿浆浓度降低, 细泥被夹带或罩盖的几率减少, 故细泥单位时间的作业回收率随浮选时间的延长而降低, 初步证明了高灰细泥主要是通过机械夹带和矿泥罩盖的方式进入精煤产品中。

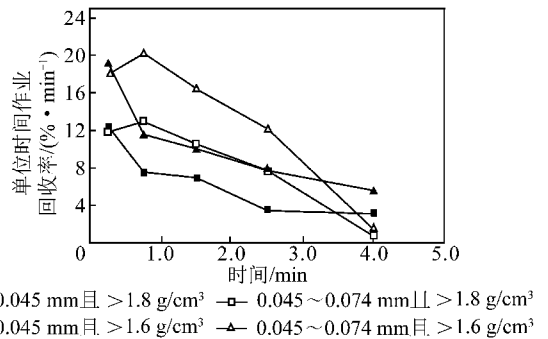


图 7 浮选过程中细泥单位时间作业回收率

Fig. 7 Operation recovery of fine mud per unit time in flotation

首要条件。当气泡与水流有相对运动时(图 8), 水掠过气泡时流线发生弯曲, 粗粒矿粒 A 因惯性力大, 不随流线弯曲, 与气泡有较高的接触概率; 而细粒矿物 C 主要受水的黏滞力作用, 易随流线弯曲而远离气泡, 中等矿粒则受重力和水黏滞力的共同作用下决定其与气泡的接触概率。

斯托克斯准数  $St$  可表征矿粒与气泡接触概率的大小<sup>[20]</sup>, 即

### 2.3 异质细泥的浮选行为分析

#### 2.3.1 细泥与气泡的接触概率

在矿浆中矿粒与气泡接触是矿粒与气泡黏着的

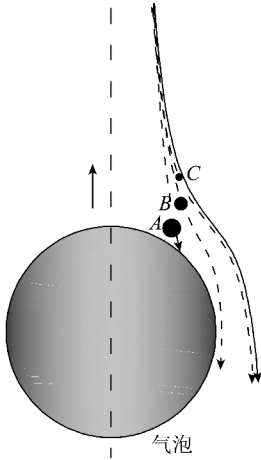


图 8 矿粒与气泡的接触

Fig. 8 Attachment of mineral particles and bubbles

$$St = \frac{Re_B \rho_p d_p^2}{9 \rho_f d_B^2} = \frac{\rho_p d_p^2 v_B}{9 \mu d_B} \quad (2)$$

式中,  $Re_B$  为气泡的雷诺数;  $\rho_p$  为矿粒密度;  $\rho_f$  为矿浆密度;  $d_B$  为气泡直径;  $d_p$  为矿粒直径;  $v_B$  为气泡升浮速度;  $\mu$  为矿浆黏度。

气泡升浮平均速度的计算公式为

$$v_B = \frac{H}{T} = \frac{Hq}{V\alpha} \quad (3)$$

其中,  $H$  为矿浆高度;  $q$  为进入矿浆的空气量;  $T$  为空气在矿浆中的停留时间;  $\alpha$  为矿浆中的空气体积分数;  $V$  为充气矿浆的体积。通过对浮选速度试验相关参数的检测, 计算出不同矿粒直径条件下的斯托克斯准数(图 9)。

当  $St < 0.1$ , 惯性力不能影响矿粒的运动轨迹, 矿粒可随水流自由滑移; 当  $0.1 < St < 1$ , 惯性力在颗粒

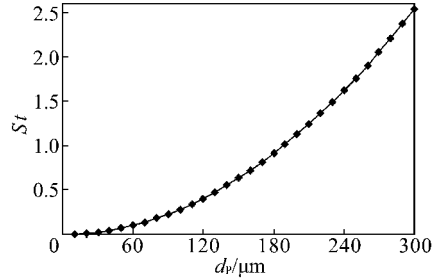


图 9 颗粒直径与斯托克斯准数的关系

Fig. 9 The relationship between particle diameter and  $St$

与气泡的接触过程发挥着一定的作用; 当  $St > 1$  时, 颗粒的运动轨迹接近直线, 与气泡发生惯性碰撞, 接触概率高。图 9 中, 随着颗粒直径的减小, 其  $St$  越小, 当颗粒的直径小于  $60 \mu\text{m}$  时,  $St < 0.1$ , 而高灰异质细泥的粒径远小于  $60 \mu\text{m}$ , 且其表面为亲水性, 所以异质细泥进入精煤极有可能是由于精煤上浮时随水流因机械夹带或罩盖在粗粒煤表面上浮至精煤产品中。

图 10 为浮选精煤表面的扫描电镜照片。随着浮选时间的进行, 从 J1 ~ J5 煤粒表面的细泥罩盖和夹带现象越来越严重, 黏附在煤粒表面的主要是  $< 3 \mu\text{m}$  粒级的异质细泥, 在同一放大倍数条件下, 浮选后期的细泥尺寸也稍有增大; 煤粒与细泥共生的现象也越来越严重, J4 和 J5 异质细泥在精煤的表面覆盖率明显高于浮选前期的 J1, J2, J3, 在 J1 ~ J3 中, 细泥尺寸小, 呈微细单粒或絮团状分布, 但在 J4 和 J5 中, 细泥主要以  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  的单粒存在, 说明在浮选后期, 随着精煤的大量浮出, 矿浆中的精煤逐渐减少, 细泥在随煤粒夹带和罩盖的上浮机会减少, 但浮选精煤浓度降低, 细泥随水流进入精煤的几率增大。

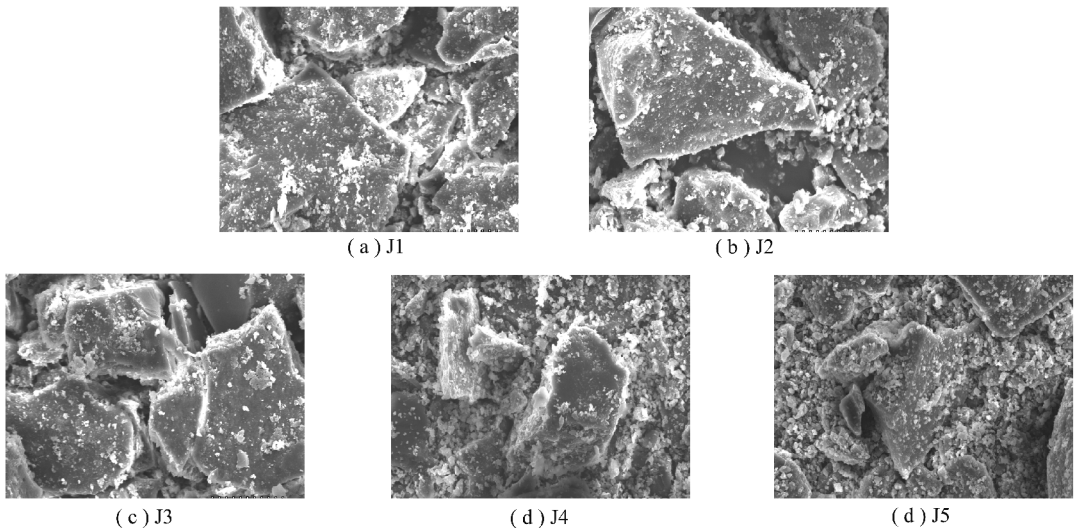


图 10 J1 ~ J5 的扫描电镜照片

Fig. 10 SEM photographs of J1 ~ J5

### 2.3.2 细泥与气泡的脱附概率

由表1的原煤粒度分析可知,该煤样以细粒级为主导并含有大量的微细颗粒,可发生异质微粒之间的互凝和微粒在粗粒表面的罩盖。从图10可以明显看见细泥在精煤表面的罩盖。一旦微细粒泥质颗粒与微细粒煤粒形成互凝聚团并与气泡发生碰撞,则其脱附概率又很小。Schulze研究得出的脱落概率 $P_d$ 表达式<sup>[20]</sup>为

$$P_d = \exp\left(1 - \frac{1}{Bo'}\right) \quad (4)$$

其中, $Bo'$ 为Bond数,其表达式为

$$Bo' = \left\{ 4R_p^2 [\Delta\rho_p g + 1.9\rho_p \beta^{2/3} (R_p + R_B)^{-1/3}] + 3R_p \left( \frac{2\sigma}{R_B} - 2R_B \rho_f g \right) \sin^2 \left( \pi - \frac{\theta}{2} \right) \right\} / \left| 6\sigma \sin \left( \pi - \frac{\theta}{2} \right) \sin \left( \pi + \frac{\theta}{2} \right) \right|$$

其中, $\Delta\rho_p = (\rho_p - \rho_f)$ ;  $\beta$ 为动能分散速率,  $W/kg$ ,  $\beta = \frac{P}{\rho_f V'} = \frac{\pi n T}{30\rho_f V'} = 24.85$  ( $P$ 为搅拌功率,  $W$ ;  $V'$ 为有效容积,  $m^3$ ;  $T$ 为扭矩,  $N \cdot m$ ;  $n$ 为搅拌轴转速,  $r/min$ );  $\theta$ 为矿粒的接触角;  $R_p, R_B$ 分别为矿粒和气泡的半径;  $\sigma$ 为气泡的表面张力,  $N/m$ 。结合浮选速度试验相关参数,扭矩经测量为  $0.088 N \cdot m$ , 计算出互凝聚团的脱附概率 $P_d$ 与聚团直径的关系(图11)。当聚团矿粒的直径小于  $60 \mu m$  时,其脱附概率几乎为零。

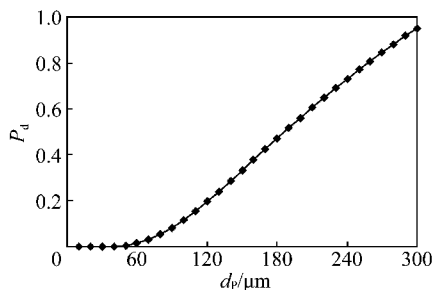


图11 颗粒直径与脱附概率的关系

Fig. 11 The relationship between particle diameter and desorption probability

## 3 结 论

(1) 浮选速度试验的精煤产品 J1 ~ J5 中均存在不同程度的细泥污染,高灰异质细泥占原煤的产率接近,但其占本级产品的产率不断升高,随着浮选时间的延长,浮选槽内物料的可浮性越来越差。

(2) 随着浮选过程的进行,灰分在 50% 以上的高灰细粒级产品累计上浮量不断增大;浮选初期  $0.045 \sim 0.074 mm$  粗粒级细泥与  $<0.045 mm$  细粒

级细泥上浮速度相近,浮选中期粗粒级细泥上浮速度高于细粒级细泥,至浮选末期细粒级细泥上浮速度高于粗粒级细泥;细泥单位时间的作业回收率逐渐降低,微细粒细泥与气泡的接触几率几乎为零,其主要是通过机械夹带和矿泥罩盖等方式进入精煤中。

(3) 在异质细泥分散和抑制方面,可通过提高浮选泡沫层厚度,以增强泡沫层的二次富集作用而减少细泥夹带;增加喷淋水减轻细泥罩盖和水流输送;加入分散剂减少细泥的非选择性上浮;借助离心力场或其他物理力场强化浮选的分选过程等,这些方法值得下一步探索研究。

## 参考文献:

- [1] 王全强. 改善难浮煤泥浮选效果的途径探讨[J]. 选煤技术, 2005(2):38-40.  
Wang Quanqiang. Discussion on the way to improve the performance of cleaning difficult-to-float coal by flotation process[J]. Coal Preparation Technology, 2005(2):38-40.
- [2] Polat M, Polat H. Physical and chemical interactions in coal flotation [J]. Mineral Processing, 2003, 72:199-213.
- [3] Ding Kejian, Janusz S, Laskowski. Coal reverse flotation. Part I: separation of a mixture of subbituminous coal and gangue minerals[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(1):72-78.
- [4] Shu Xinqian, Wang Zuna, Xu Jingqiu. Separation and preparation of macerals in Shenfu coals by flotation[J]. Fuel, 2002, 81(4):495-501.
- [5] 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.
- [6] 蔡 璋, 蒋荣立, 罗时磊, 等. 极细粒煤泥分选新方法——选择性絮凝[J]. 中国矿业大学学报, 1993, 22(1):54-61.  
Cai Zhang, Jiang Rongli, Luo Shilei, et al. The new method of ultra-fine coal separation-selective flocculation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1993, 22(1):54-61.
- [7] 王怀法, 湛含辉, 杨润全. 高灰极难选煤泥的絮凝浮选试验研究[J]. 选煤技术, 2001(1):17-19.  
Wang Huafu, Zhan Hanhui, Yang Runquan. Experimental study on flocculation flotation of high ash and difficult floatable coal[J]. Coal Preparation Technology, 2001(1):17-19.
- [8] 崔广文, 张继柱, 扶祥通, 等. 煤泥粒度组成对浮选影响的研究[J]. 选煤技术, 2007(4):20-22.  
Cui Guangwen, Zhang Jizhu, Fu Xiangtong, et al. Study of influence of grain size on the fine coal flotation[J]. Coal Preparation Technology, 2007(4):20-22.
- [9] Jameson G J. Advances in fine and coarse particle flotation[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2010, 49(4):328-330.
- [10] Seher Ata, Nafis Ahmed, Graeme J Jameson. Collection of hydrophobic particles in the froth phase[J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 64(2-3):101-102.



- [11] 陶有俊,刘文礼,路迈西. 细粒煤浮选数学模型的研究[J]. 中国矿业大学学报,1999,28(5):425-428.  
Tao Youjun, Liu Wenli, Lu Maixi. Research on mathematical model of fine coal flotation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(5):425-428.
- [12] Lynch A J. Mineral and coal flotation circuits their simulation and control[M]. Amsterdam:Elsevier Press, 1981:64-68.
- [13] Moxon N T, Nicol K, Bensley C N, et al. Chemical variables in coarse coal flotation[J]. Coal Preparation, 1993, 12(1-4):15-26.
- [14] 周凌锋,傅联海,张强. 高效细粒浮选柱[J]. 有色金属, 2007, 59(2):55-58.  
Zhou Lingfeng, Fu Lianhai, Zhang Qiang. Efficient flotation column for fine particles[J]. Nonferrous Metals, 2007, 59(2):55-58.
- [15] Weber Me, Paddock D. Interceptional and gravitational collision efficiencies for single collectors at intermediate Reynolds numbers[J]. Journal of Colloid Science, 1994, 3(5):327-335.
- [16] Schneider J C, Weert G Van. Design of operation of the hydrochem hydrochem flotation column[J]. Column Flotation, 1999, 11(7):287-292.
- [17] 王加强,史新忠,单光明,等. FXZ 静态浮选柱与浮选机分选高灰细泥的效果对比[J]. 煤炭加工与综合利用, 2007(4):22-24.  
Wang Jiaqiang, Shi Xinzhong, Shan Guangming, et al. The effect contrast of FXZ static column flotation and flotation machine on the separation of high mud fine coal[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2007(4):22-24.
- [18] 张慧,王晓刚,张科选,等. 煤中难选矿物质赋存状态与综合利用研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(S1):27-29.  
Zhang Hui, Wang Xiaogang, Zhang Kexuan, et al. Study on existing state of hard dressing mineral matter within coal and its comprehensive utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(S1):27-29.
- [19] Creelman R A, Ward C R. A scanning electron microscope method for automated, quantitative analysis of mineral in coal[J]. International Journal of Coal Geology, 1996, 30(3):249-269.
- [20] Hans Joachim Schulze, Werner Stockelhuber. Coagulation and flocculation[M]. London:Taylor & Francis Group, 2005:456-517.

## 2012 年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的、向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学引文数据库、科学技术文摘速报(日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004, 2007, 2010, 2011 年分别入选第三、第六、第九和第十届“百种中国杰出学术期刊”。2008, 2011 年荣获“中国精品科技期刊”称号。2009 年荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,每期 176 页,每册订价 58 元,全年共收费 696 元。欲订阅者可直接与本编辑部联系,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-804 联系人:毕永华

E-mail:mtxbbyh@126.com