

门东坡,张磊,刘文礼.低阶烟煤煤岩组分解离特性及其分选[J].煤炭学报,2015,40(S2):479-485. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0398

Men Dongpo, Zhang Lei, Liu Wenli. Liberation characteristics and separation of macerals for lower rank bituminous coal [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 479-485. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.0398

## 低阶烟煤煤岩组分解离特性及其分选

门东坡,张磊,刘文礼

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院,北京 100083)

**摘要:**为研究低阶烟煤煤岩显微组分的分选,以高惰质组含量的神东长焰煤为研究对象,利用偏光显微镜 Leica DM4500P,分析了不同破碎程度下煤岩显微组分的分布形态和解离规律,确定了煤岩组分的最佳解离粒度,并对比了不同破碎程度下煤岩显微组分的重力分选结果。煤岩显微组分的解离特性表明,随着破碎粒度的降低,镜质组含量先基本不变,后逐渐降低,而惰质组含量先基本不变,后逐渐增加;当破碎粒度为 0.125 mm 时,镜质组单体解离度为 91.77%,惰质组单体解离度为 86.77%,连生体含量为 8.05%;不同破碎程度下的煤岩显微组分重力分选结果表明,将煤样破碎至 -0.125 mm,当分选密度为 1.33 kg/L 时,可获得镜质组含量为 89.05%、镜质组回收率为 58.72% 的富镜质组富集物。

**关键词:**低阶烟煤;煤岩组分;单体解离度;解离特性;煤岩分选

中图分类号:TD922 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2015)S2-0479-07

### Liberation characteristics and separation of macerals for lower rank bituminous coal

MEN Dong-po, ZHANG Lei, LIU Wen-li

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

**Abstract:** Maceral separation is a priority for improving the deep processing and utilization efficiency of coal resources on the basis of the characteristics difference of maceals. Based on long flame coal with high inertinite content in Shendong coalfield, using a microscopy Leica DM4500P, this paper analyzed the distribution occurrence and liberation characteristics, determined the optimum liberation size, and compared the results of maceral separation using density-based separation method under different crushing degrees. The liberation characteristics of maceral demonstrates that, with an increase in crushing size, vitrinite content stays almost unchanged initially and then decreases while inertinite content stays almost unchanged initially and then increases; Crushing coal sample to -0.125 mm improves the free fractional degree of vitrinite and inertinite as high as 91.77% and 86.77%, respectively, and also reduces the content of interlocked particle 8.05%; Maceral separation of coal samples under different crushing degrees shows that maceral separation using separation density 1.33 kg/L for -0.125 mm coal sample produces vitrinite-rich concentrate with vitrinite content 89.05% and vitrinite recovery 58.72%.

**Key words:** lower rank bituminous coal; macerals; free fractional degree; liberation characteristics; maceral separation

煤是由性质各异的有机显微组分和少量的无机矿物质组成的复杂混合物,其中有机显微组分包含镜质组、惰质组和壳质组<sup>[1]</sup>。前苏联阿莫索夫指出,煤

的工艺性质是煤的变质程度及其煤岩组成的函数,煤岩显微组分在不同应用领域表现出不同的工艺性质<sup>[1]</sup>。

镜质组和壳质组是煤炭转化过程中的活性组分,具有黏结性高、气化活性高、油转化率高等优点,可大比例应用于炼焦、气化、液化等领域;惰质组因其极弱或无活性,在制备石墨、活性炭等碳材料方面具有较广泛的应用<sup>[2-5]</sup>。基于煤岩显微组分在不同应用领域所表现出的不同工艺性质,利用煤岩显微组分分离技术,分离富集具有不同性质的煤岩组分富集物并加以区别利用,为提高煤炭资源的加工利用深度和利用效率提供重要的技术途径<sup>[6-7]</sup>。

目前煤岩显微组分的分选技术主要有化学法和物理法,其中物理法因其对煤岩组分性质的破坏性小而应用范围广、研究较多,主要包括手选、筛分选、重力选、浮选、磁选以及静电选等。如 Domrans 提出了沉/浮技术分离煤岩显微组分<sup>[8]</sup>; Dyrkacz 等<sup>[9-11]</sup>在重液离心分离的技术上,开发了等密度梯度离心分离技术;龙江等<sup>[12]</sup>利用浮选技术对新疆煤煤岩组分进行分选研究;赵伟等<sup>[13]</sup>研究了  $AlCl_3$  对煤岩组分浮选分离过程的作用,揭示  $AlCl_3$  对煤岩组分的作用机制;文献[14]分别利用磁选、静电选进行煤岩显微组分分选研究。然而,无论重选、浮选,抑或磁选和静电选,其重要前提是煤岩显微组分之间彼此分离,只有不同煤岩显微组分充分解离,掌握其最佳解离粒度,才有可能选择适合的分离技术,进而实现煤岩显微组分的高效分离、富集<sup>[15]</sup>。矿物单体解离度是表征矿物破碎效果的重要指标,一般是指目的矿物以单体颗粒形式存在的量占该组分总量的百分数,测定方法主要有显微镜下观察统计法、光谱颗粒法、重液梯度离心分离法、粉末 X 射线衍射法、自动图像分析仪测定法等<sup>[16]</sup>。

本文主要以高惰质组含量的低变质程度神东长焰煤为研究对象,运用显微镜下观察统计法,研究镜质组和惰质组在不同破碎程度下的分布形态和解离规律,分析确定煤岩组分分选的最佳解离粒度,并与不同破碎程度下煤岩显微组分的重力分选结果进行对比,为富惰质组煤的高效利用提供技术指导。

## 1 实 验

### 1.1 实验对象

选取神东矿区的煤样作为实验对象,进行工业分析和煤岩分析等检测分析。

### 1.2 煤岩组分解离特性

试验方案如图 1 所示,其中,1 号为首先用颚式破碎机将煤样粗碎至 10 mm,然后用万能粉碎机将粗碎煤样分别破碎至 -0.5, -0.25, -0.125 和 -0.074 mm;2 号为参照国标《煤的显微组分和矿物

测定方法》(GB/T 8899—1998)进行单体解离度测定的样品光片的制备,即首先将待测煤样与虫胶按照一定比例混合,采用热胶法制备粉煤光片,经粗磨、细磨及抛光等作业流程后,置于 40 ℃ 的干燥箱内干燥 4 h;然后将该光片置于偏光显微镜 Leica DM4500P 的油镜下,白光入射,根据显微组分的镜下特征差异进行组分判定,并用数点法统计体积分数;同时根据显微组分的存在形式确定镜下十字丝所压颗粒的颗粒类型,当显微镜下十字丝所压颗粒仅含镜质组分则定义为单体镜质组,仅含惰质组分,则定义为单体惰质组,当十字丝所压颗粒为连生体颗粒,若十字丝所压点为镜质组分则定义为连生体镜质组,若所压点为惰质组分,则定义为连生体惰质组。

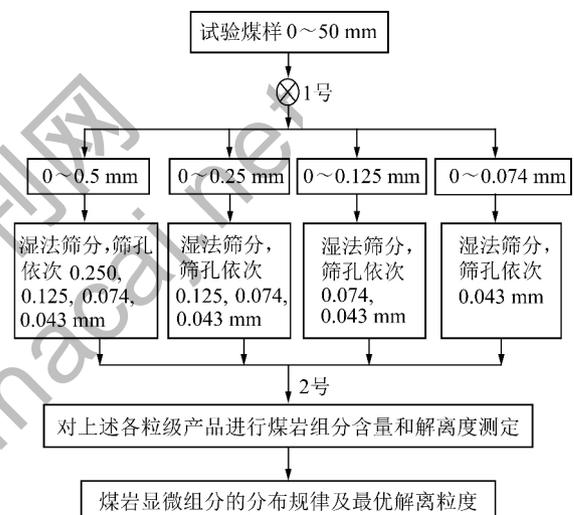


图 1 试验技术路线

Fig. 1 Technical flowsheet of this experiment

### 1.3 煤岩组分分选

选取不同破碎程度下的 4 种样品,利用离心浮沉实验进行煤岩显微组分的分选研究,分选密度依次为 1.27, 1.33 和 1.39 kg/L。操作过程为:样品与特定密度的  $ZnCl_2$  溶液先后给入离心罐,经玻璃棒搅拌均匀,在 3 000 r/min 转速下运行 30 min 后,静置 2 h,分别获得沉下物和上浮物,在沉下物中加入高密度的  $ZnCl_2$  溶液继续进行离心操作;将获得产品分别进行过滤、热水清洗,除去黏附于产品上的  $ZnCl_2$ ,烘干,称重,计算各密度级的产品产率;并将干燥后产品制备粉煤光片,测定煤岩显微组分含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 煤岩显微组分的解离特性

表 1 为神东煤的工业分析和煤岩分析结果,其挥发分为 37.10%,镜质组平均最大反射率为 0.61%,属长焰煤;煤中惰质组含量高达 41.70%,壳质组和

矿物质含量很低,为3%左右,可忽略不计。因此,镜质组和惰质组是主要的煤岩组分,而镜质组(惰质组)包含单体镜质组(惰质组)和连生体镜质组(惰质组)2种类型。

表 1 煤样的工业分析和岩相分析

Table 1 Proximate and petrographic analysis of coal samples %

工业分析			煤岩显微组分含量				$\bar{R}_{max}$
$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{daf}$	镜质组	惰质组	壳质组	矿物质	
2.98	8.30	37.10	55.14	41.70	0.40	2.76	0.61

2.1.1 煤岩组分的分布规律

表 2 为不同破碎程度下各粒级煤样的煤岩组成及煤岩组分单体解离度的分析结果,其中,

表 2 不同破碎程度下各粒级煤样煤岩组成及煤岩组分单体解离度分析表

Table 2 Maceral composition and free fractional degree analysis of different sizes coal samples under different crushing degree

破碎粒度/mm	粒级/mm	产率/%	单体含量/%		连生体含量/%		镜质组含量/%	惰质组含量/%	$F_V$ /%	$F_I$ /%
			镜质组	惰质组	镜质组	惰质组				
-0.5	0.50~0.25	36.78	39.08	22.41	18.39	14.37	57.47	36.78	68.00	60.94
	0.250~0.125	28.02	44.61	22.90	13.44	15.21	58.05	38.11	76.84	60.08
	0.125~0.074	9.34	54.39	25.94	7.14	9.65	61.53	35.59	88.39	72.89
	0.074~0.043	7.02	44.97	37.72	6.66	7.54	51.63	45.27	87.11	83.33
	-0.043	18.84	33.23	59.72	1.57	2.04	34.80	61.76	95.50	96.70
	合计	100	41.37	30.98	11.96	11.36	53.33	42.34	77.57	73.17
-0.25	0.250~0.125	46.35	43.94	21.43	14.07	14.07	58.01	35.50	75.75	60.37
	0.125~0.074	20.99	54.46	27.01	6.33	9.04	60.79	36.05	89.59	74.92
	0.074~0.043	9.68	48.94	36.82	4.55	6.06	53.48	42.88	91.50	85.87
	-0.043	22.98	39.30	53.01	2.01	1.34	41.30	54.35	95.14	97.54
	合计	100	45.57	31.35	8.75	9.31	54.32	40.66	83.89	77.10
-0.125	0.125~0.074	46.60	53.11	28.07	6.38	8.77	59.49	36.84	89.28	76.19
	0.074~0.043	14.40	50.21	34.39	4.85	6.12	55.06	40.51	91.19	84.90
	-0.043	39.00	43.24	50.15	1.65	1.95	44.89	52.10	96.32	96.25
	合计	100	48.84	37.59	4.32	5.73	53.16	43.32	91.88	86.77
-0.074	0.074~0.043	8.51	61.09	17.51	7.78	3.50	68.87	21.01	88.70	83.33
	-0.043	91.49	49.86	43.06	1.88	1.59	51.73	44.65	96.37	96.44
	合计	100	50.81	40.89	2.38	1.75	53.19	42.64	95.52	95.89

少,惰质组含量明显增大;随着粒级由0.074~0.043 mm降低至-0.043 mm,镜质组含量逐渐减小,惰质组含量逐渐增大,说明对于低变质程度烟煤,镜质组质软、不易碎,而惰质组质脆、易碎,在破碎过程中易碎裂成为细粒产品,富集于细粒级中,这与蔡昌凤<sup>[17]</sup>以低变质程度煤为对象的研究结论一致。

(2) 随着破碎程度沿-0.5,-0.25,-0.125和-0.074 mm的顺序逐渐加深,各破碎煤样的

$$F_V = \frac{\psi_V}{\psi_V + \psi_{CV}} \times 100\%$$

$$F_I = \frac{\psi_I}{\psi_I + \psi_{CI}} \times 100\%$$

式中, $F_V$ 、 $F_I$ 分别为镜质组和惰质组单体解离度; $\psi_V$ 、 $\psi_I$ 分别为单体镜质组和单体惰质组含量; $\psi_{CV}$ 、 $\psi_{CI}$ 分别为连生体镜质组和连生体惰质组含量。

由表 2 不同破碎程度下各粒级产品中镜质组和惰质组含量与相对应粒级的关系可知:

(1) 对于-0.5,-0.25,-0.125和-0.074 mm粒级的破碎煤样,0.50~0.25,0.250~0.125和0.125~0.074 mm粒级产品中镜质组与惰质组含量基本不变;0.074~0.043 mm和-0.043 mm粒级产品相较于+0.074 mm粒级各产品,镜质组含量明显减

-0.043 mm粒级产品的镜质组含量逐渐增大,说明尽管镜质组质软、不易碎,但当施加足够多的外力时,仍可被破碎,解离程度增加。

2.1.2 单体煤岩组分的分布规律

为了表征特定破碎程度下不同粒级产品的单体煤岩组分解离特性,以-0.5 mm煤样为例进行阐述,图 2 为-0.5 mm样品中不同粒级产品的煤岩组分单体解离度随产品粒度的分布规律。图 3 为不同破碎

程度下煤样镜质组和惰质组单体解离度与煤样粒度之间的变化关系。

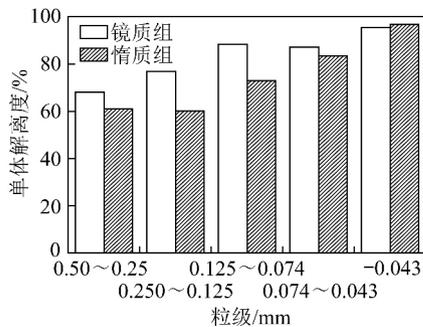


图2 -0.5 mm 样品各粒度级产品煤岩组分单体解离度与产品粒度的关系

Fig. 2 Relationship of free fractional degree of macerals and size for -0.5 mm coal sample

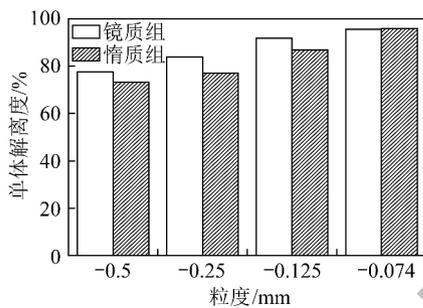


图3 不同破碎程度下煤岩组分的单体解离度与破碎粒度的关系

Fig. 3 Relationship between free fractional degree of maceral and crushing size under different crushing degree

由图2可以看出,对于特定破碎程度煤样,各粒度级产品的镜质组(惰质组)的单体解离度随着产品粒度的降低而逐渐增加,以-0.5 mm煤样为例,当镜质组单体解离度约为90%时,对应产品粒度为-0.125 mm时;当惰质组单体解离度为90%,则对

应的产品粒度为-0.043 mm。

由图3可以看出:

(1) 当破碎粒度分别为-0.5, -0.25, -0.125和-0.074 mm时,破碎煤样的镜质组单体解离度分别为77.57%, 83.89%, 91.88%和95.52%,惰质组单体解离度分别为73.17%, 77.10%, 86.77%和95.89%;说明随着破碎程度的增加,镜质组和惰质组解离效果逐渐变好,以单体形式存在的量逐渐增加,以连生体形式存在颗粒相应减少;当破碎粒度为0.125 mm时,镜质组和惰质组单体解离度均已达到85%,镜质组和惰质组已实现较好的解离。

(2) 当破碎粒度沿0.5, 0.25, 0.125和0.074 mm逐渐降低时,镜质组单体解离度的增加速率不同,如由0.5 mm减小到0.25 mm和由0.25 mm减小到0.125 mm时,镜质组单体解离度分别增加6.32%和8.00%,而当由0.125 mm减小到0.074 mm时,镜质组单体解离度仅增加3.64%;说明破碎作用对镜质组的解离效果主要发生在+0.125 mm粒度范围内,虽然进一步的破碎可以增强煤岩组分的解离效果,但解离效果的增加幅度不大;另外细粒度破碎不仅耗能大,还容易造成煤岩组分过粉碎,对后续分选作业不利。因此,认为煤岩组分的最佳解离粒度为0.125 mm。

### 2.1.3 连生体煤岩组分的分布规律

煤岩显微组分解离即通过破碎作用将煤岩组分的连生体颗粒解离成单煤岩组分颗粒,接下来探讨不同类型连生体在不同破碎程度下的解离规律。煤岩组分连生体的存在形式主要有毗邻型、细脉型和壳层型,镜下特征如图4所示。破碎至-0.5, -0.25, -0.125和-0.074 mm等各破碎粒度煤中不同类型连生体的测定结果见表3。

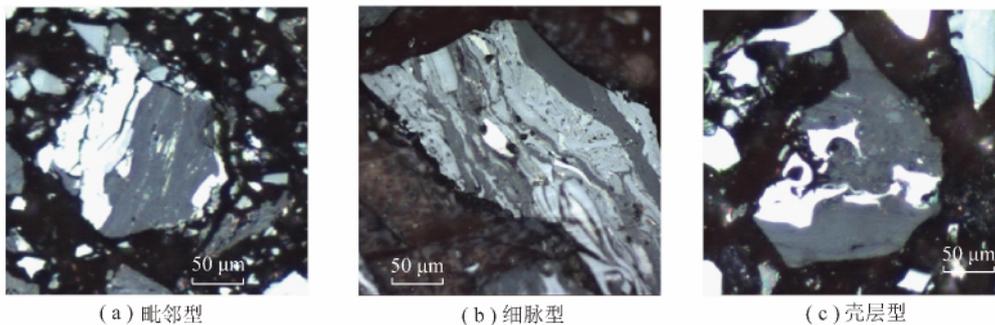


图4 连生体颗粒特征

Fig. 4 Microscopic images of three types of interlocked particles

由表3可以看出:①随着破碎粒度的降低,毗邻型、细脉型和壳层型连生体颗粒总体呈下降趋势,说明随着破碎程度的增加,3种类型连生体颗粒均可能

被解离为单体颗粒;②当破碎粒度为0.5 mm和0.25 mm时,-0.5 mm和-0.25 mm粒度煤中毗邻型连生体含量基本不变;细脉型和壳层型连生体含量随

表 3 不同破碎程度下煤样 3 种类型连生体含量的测定  
Table 3 Determination of three types of interlocked particles under different crushing degree

破碎粒度/mm	连生体含量/%			
	毗邻型	细脉型	壳层型	合计
-0.5	8.28	7.80	7.24	23.32
-0.25	8.31	5.74	4.01	18.06
-0.125	5.43	2.03	0.58	8.05
-0.074	3.81	0.32	0	4.13

破碎粒度降低逐渐减小。分析原因可能是随着破碎的进行,必然会有一部分毗邻型连生体解离形成单体显微组分;而细脉型连生体和壳层型连生体在破碎过程中一部分解离形成单体显微组分,另一部分则形成毗邻型连生体,从而弥补了毗邻型连生体由于解离成单体而减少的部分,所以毗邻型连生体的含量几乎不变;③当破碎粒度为 0.125 mm 时,连生体含量为 8.05%,毗邻型连生体颗粒含量也开始出现明显减少,且细脉型和壳层型连生体颗粒已经基本消失。因

此根据 3 种类型连生体随破碎粒度的变化关系可以看出,煤岩显微组分的最优解离粒度为 0.125 mm。

2.2 煤岩显微组分的分选效果

表 4 为不同破碎程度下煤样浮沉实验及其产品的煤岩分析结果。为了全面、有效地评价煤岩组分分选效果的好坏,除了镜质组和惰质组含量外,引入镜质组回收率和惰质组脱除率作为评价指标,

$$\eta_v = \frac{\psi_1 \alpha}{\psi'_1} \times 100\%$$

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{\psi_2 \alpha}{\psi'_2}\right) \times 100\%$$

其中  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为镜质组回收率和惰质组脱除率;  $\psi_1$ 、 $\psi'_1$  为产品中和入料中镜质组含量;  $\psi_2$ 、 $\psi'_2$  为产品中和入料中惰质组含量;  $\alpha$  为产品产率。入料中镜质组(惰质组)含量为浮沉实验入料煤镜质组(惰质组)的体积含量(表 4 中以各密度级产品加权计算得出); 产品中镜质组(惰质组)含量为小于分选密度所有产品镜质组(惰质组)的体积分数。

表 4 不同破碎程度下煤样浮沉试验及其产品的煤岩分析

Table 4 Petrographic analysis and float-sink test of coal samples under different crushing degree

解离粒度/mm	密度级/ (g·cm <sup>-3</sup> )	产率/%	灰分/%	镜质组含 量/%	惰质组含 量/%	$\eta_v$ /%	$\eta_1$ /%
-0.5	-1.27	0.55	2.25			0	100
	1.27~1.33	20.56	3.89	70.20	28.50	26.24	85.28
	1.33~1.39	38.73	4.10	62.10	36.19	68.83	50.98
	+1.39	40.16	14.87	43.83	51.87	100	0
-0.25	-1.27	0.58	2.40			0	100
	1.27~1.33	27.12	2.25	80.28	18.13	40.77	88.14
	1.33~1.39	34.91	3.02	60.30	38.50	79.37	56.39
	+1.39	37.39	16.77	30.10	63.84	100	0
-0.125	-1.27	1.59	2.46			0	100
	1.27~1.33	34.84	2.94	89.05	9.95	58.72	91.23
	1.33~1.39	32.06	4.41	50.03	48.26	87.76	53.77
	+1.39	31.51	19.72	21.45	70.50	100	0
-0.074	-1.27	0.91	3.98			0	100
	1.27~1.33	24.29	4.63	90.54	8.11	41.37	94.96
	1.33~1.39	48.64	5.02	54.31	43.51	87.52	42.74
	+1.39	26.17	17.95	26.83	66.20	100	0

注:以 -0.5 mm 煤样为例:当分选密度为 1.33 时,  $\eta_v = [(0.55 + 20.56) \times 28.50] / [(0.55 + 20.56) \times 28.50 + 38.73 \times 36.19 + 40.16 \times 51.87] = 26.24\%$ ; 当分选密度为 1.39 时,  $\eta_v = [(0.55 + 20.56) \times 28.50 + 38.73 \times 36.19] / [(0.55 + 20.56) \times 28.50 + 38.73 \times 36.19 + 40.16 \times 51.87] = 68.83\%$ 。

图 5 为不同破碎程度下破碎煤样分选产品的镜质组含量随其密度的变化关系。可以看出:①在特定破碎程度下,各密度级产品的镜质组含量随着密度的增加而逐渐降低,以 -0.5 mm 破碎煤样为例,当分选密度逐渐增加时,所获产品的镜质组含量则由

70.20% 降低至 43.83%,这与文献 [16] 所获得的煤岩组分随密度的变化规律一致;②当以 1.27~1.33 kg/L 密度级产品的镜质组含量作为评价不同破碎程度下的解离情况,随着破碎深度的逐渐增加,破碎煤样粒度由 -0.5 mm 降低至 -0.074 mm,产品的镜质

组含量逐渐增加,说明经过破碎作用,镜质组单体数量逐渐增加,煤岩显微组分分解离效果增加;③当破碎程度增加至某一粒级后,破碎程度的继续加深对产品镜质组含量的影响很小,如 $-0.125\text{ mm}$ 破碎煤样的 $1.27\sim 1.33\text{ kg/L}$ 密度级产品的镜质组含量为 $89.05\%$ ;而对 $-0.074\text{ mm}$ , $1.27\sim 1.33\text{ kg/L}$ 密度级产品的镜质组含量仅为 $90.54\%$ ;因此,从不同破碎程度下分选产品镜质组含量的角度可知,煤岩显微组分的最优解离粒度为 $0.125\text{ mm}$ 。

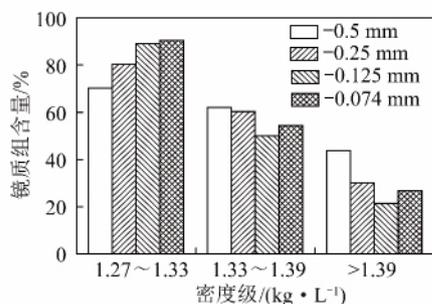


图5 不同破碎程度煤样分选产品镜质组含量与对应密度级的关系

Fig. 5 Relationship between vitrinite content of concentrates and their density under different crushing degree

分选过程效果好坏的评价要综合考虑产品中有用物质的含量和有用物质的回收率,下面以镜质组回收率作为评价不同破碎程度物料的煤岩显微组分分选效果的指标。需要指出煤岩显微组分分选的目的是获得高镜质组含量的富镜质组产品,因此在分析过程中,主要考虑 $1.27\sim 1.33\text{ kg/L}$ 密度级的富镜质组产品。图6为不同破碎程度下的富镜质组产品的镜质组回收率与破碎粒度之间的关系。

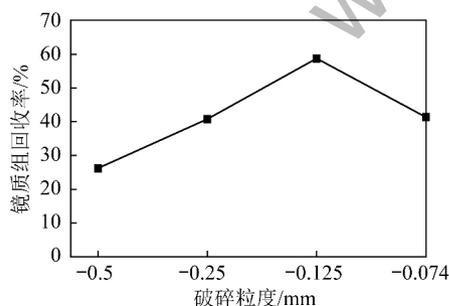


图6 不同破碎程度物料分选的富镜质组产品的镜质组回收率与破碎物料粒度的关系

Fig. 6 Relationship between vitrinite recovery of vitrinite-rich concentrates and sample size under different crushing degree

由图6可以看出,随着破碎程度的加深,破碎粒度逐渐减小,富镜质组富集物的镜质组回收率先显著提高,后又逐渐降低,当破碎粒度由 $-0.5\text{ mm}$ 降低至 $-0.125\text{ mm}$ 时,镜质组回收率由 $26.24\%$ 增加至

$58.72\%$ ,这对提高镜质组回收率十分有利;当破碎粒度由 $-0.125\text{ mm}$ 降低至 $-0.074\text{ mm}$ 时,镜质组回收率又降低至 $41.37\%$ ,这主要是富镜质组富集物产品产率降低导致,说明细粒度破碎可以实现煤岩组分的更好的解离,但将会对其分选回收造成困难。

综上所述,结合分选产品的镜质组含量和回收率,对于低变质程度的神东长焰煤,煤岩显微组分分选的最优操作条件为将煤样破碎至 $-0.125\text{ mm}$ ,分选密度为 $1.33\text{ kg/L}$ ,可以获得镜质组含量为 $89.05\%$ 、镜质组回收率为 $58.72\%$ 的富镜质组产品。

### 3 结 论

(1) 在不同破碎程度下,对 $+0.074\text{ mm}$ 各粒级产品,镜质组和惰质组含量基本不变;对 $-0.074\text{ mm}$ 各粒级产品,随着粒级减小,镜质组含量减少,惰质组含量增加。

(2) 破碎程度的加深可以提高煤岩显微组分单体解离度增加,当解离粒度为 $0.125\text{ mm}$ 时,镜质组单体解离度达到 $91.77\%$ ,惰质组单体解离度达到 $86.77\%$ 。

(3) 随着破碎粒度减小,毗邻型、细脉型和壳层型连生体颗粒含量逐渐减少,当破碎粒度为 $0.125\text{ mm}$ 时,连生体颗粒含量降低至 $8.05\%$ 。

(4) 结合不同破碎程度下的分选产品的镜质组含量和回收率,认为低变质程度的神东煤煤岩显微组分分选的最优条件即将煤样破碎至 $-0.125\text{ mm}$ ,分选密度为 $1.33\text{ kg/L}$ ,可获得镜质组含量为 $89.05\%$ 、镜质组回收率为 $58.72\%$ 的富镜质组富集物。

### 参考文献:

- [1] 韩德鑫. 中国煤岩学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1996.
- [2] Keogh R A, Taulbee D N, Hower J C, et al. Liquefaction characteristics of the three major maceral groups separated from a single coal [J]. Energy & Fuels, 1992, 6(5): 614-618.
- [3] Gagarin S G, Krichko A A. The petrographic approach to coal liquefaction [J]. Fuel, 1992, 71(7): 785-791.
- [4] 李国玲, 秦志宏, 倪中海. 煤岩显微组分的性质研究进展 [J]. 辽宁大学学报, 2013, 40(1): 48-55.  
Li Guoling, Qin Zhihong, Ni Zhonghai. Advances in the characteristics of coal macerals [J]. Journal of Liaoning University, 2013, 40(1): 48-55.
- [5] 唯耐迟, 李保庆, 李文, 等. 煤的岩相显微组分对水煤浆性质的影响 [J]. 燃料化学学报, 2003, 31(5): 415-419.  
Wei Yuchi, Li Baoqing, Li Wen, et al. Effect of macerals on the properties of coal water slurry [J]. Journal of Fuel Chemistry Technology, 2003, 31(5): 415-419.
- [6] 赵伟, 周安宁, 李远刚. 微波辅助磨矿对煤岩组分分解离的影响 [J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 140-144.

- Zhao Wei, Zhou Anning, Li Yuangang. The influence of microwave-assisted grinding on coal macerals dissociation [J]. *Journal of China Coal Society* 2011, 36(1): 140-144.
- [7] Zhang Lei, Liu Wenli, Men Dongpo. Preparation and coking properties of coal maceral concentrates [J]. *International Journal of Mining Science and Technology* 2014, 24(1): 93-98.
- [8] 舒新前, 王祖訥, 葛零梅. 煤岩组分分离与选别的研究现状及前景展望 [J]. *煤炭转化*, 1996, 19(1): 40-45.  
Shu Xinqian, Wang Zuna, Ge Lingmei. Research status and prospects of separation and preparation of coal petrographic constituents [J]. *Coal Conversion*, 1996, 19(1): 40-45.
- [9] Dyrkacz G R, Horwitz E P. Separation of coal macerals [J]. *Fuel*, 1982, 61(1): 3-12.
- [10] Dyrkacz G R, Bloomquist C A A, Ruscic L. High-resolution density variation of coal macerals [J]. *Fuel*, 1984, 63(10): 1367-1373.
- [11] Dyrkacz G R, Bloomquist C A A, Solomon P R. Fourier transform infrared study of high-purity maceral types [J]. *Fuel*, 1984, 63(4): 536-542.
- [12] 龙江, 杨志远, 屈世存, 等. 浮选法分离富集新疆煤岩组分的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(2): 489-494.  
Long Jiang, Yang Zhiyuan, Qu Shicun, et al. The test of separation and enrichment of Xinjiang coal maceral by flotation [J]. *Journal of China Coal Society* 2013, 38(2): 489-494.
- [13] 赵伟, 赵世永, 杨志远, 等.  $AlCl_3$  对煤岩组分浮选分离的影响 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(1): 185-190.  
Zhao Wei, Zhao Shiyong, Yang Zhiyuan, et al. Influence of  $AlCl_3$  on flotation separation of coal macerals [J]. *Journal of China Coal Society* 2015, 40(1): 185-190.
- [14] Suarez-Ruiz I, Crelling J C. Applied coal petrology: The role of petrology in coal utilization [M]. Academic Press, 2008.
- [15] 曾凡桂, 郝玉英. 镜煤与丝炭粉碎特性的比较研究 [J]. *燃料化学学报*, 1998, 26(6): 575-578.  
Zeng Fangui, Hao Yuying. Contrast study of comminuting property of vitrain and fusain [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 1998, 26(6): 575-578.
- [16] 段旭琴. 神府煤岩组分结构性质及分选的实验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2004: 77-78.  
Duan Xuqin. Experimental study on shenfu macerals separation based on structure and physico-chemical property investigation [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2004: 77-78.
- [17] 蔡昌凤. 煤岩组分的解离特性与分离技术 [J]. *洁净煤技术*, 1998, 4(3): 24-27.  
Cai Changfeng. Dissociation character and separation technique of coal petrographical constituent [J]. *Clean Coal Technology*, 1998, 4(3): 24-27.