

# 煤制油选煤厂煤显微组分迁移规律

朱子祺

(国家能源集团神东洗选中心, 陕西 榆林 719315)

**摘要:**神华煤制油选煤厂生产的精煤产品供应煤制油公司作为制油原料, 为了进一步提供良好的原料和高质量的制油原料煤, 探索煤显微组分在洗选加工过程中的迁移规律, 进而为后续生产工艺优化提供新的思路。以煤制油选煤厂的流程样品为试验煤样, 通过工业分析、显微镜分析和红外光谱分析方法, 结合在线计量工具, 分析了不同有机组分在生产过程中的迁移规律, 给出了选煤厂提高产品质量的理论途径。结果表明: 神东煤制油原料煤 H/C 比为 0.84, 属于良好的煤制油原料; 原煤灰分为 9.45%, 镜质组含量为 57.88%, 惰质组含量为 38.18%。0.50~0.25 mm 镜质组含量为 55.97%, 现有工艺未对其进行有效分选, 需要加强粗煤泥分选。不同粒度显微组分含量差别不大, 通过破碎筛分达到镜质组富集的难度较大。镜质组中 88% 进入重介精煤, 7% 进入粗煤泥, 5% 进入细煤泥; 惰质组中 59% 进入重介精煤, 25% 进入矸石, 7% 进入粗煤泥产品, 9% 进入细煤泥产品。现有分选工艺对惰质组与镜质组的高效分离有待提高, 需进一步提高选择性和降低分选密度。

**关键词:**显微组分; 迁移; 组分富集; 镜质组; 惰质组

中图分类号: TD94

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2020)06-0089-07

## Migration rule of coal macerals in coal-to-oil preparation plant

ZHU Ziqi

(CHN Energy Shendong Coal Preparation Center, Yulin 719315, China)

**Abstract:** The refined coal products produced by Shenhua coal-to-oil preparation plant are supplied to coal-to-oil companies as raw materials for oil production. In order to provide better raw materials and high quality raw coal for oil production, the migration law of coal macerals in the process of washing and processing was explored, and then a new idea was provided for the optimization of the following production process. Taking the process sample of coal-to-oil preparation plant as the test coal sample, and by using process samples, industrial analysis, microscope analysis and infrared spectrum analysis, and combined with on-line measuring tools, the migration of different organic components in the production process was analyzed, and the theoretical approach to improve product quality in coal preparation plant was given. The results show that the H/C ratio of Shenhua raw coal is 0.84, which is a good raw material for coal-to-liquids. The content of raw coal ash is 9.45%, vitrinite content is 57.88%, inertinite content is 38.18%. The content of 0.50-0.25 mm vitrinite is 55.97%. The existing technology does not effectively separate the coarse coal slime, so it is necessary to strengthen the separation of coarse coal slime. It is difficult to enrich vitrinite by crushing and sieving because the contents of macerals in different sizes are not very different. In vitrinite group, 88% enter into heavy medium cleaned coal, 7% into coarse slime, 5% into fine slime, and in inertinite group, 59% enter into heavy medium cleaned coal, 25% into gangue, 7% into coarse slime, 9% into fine slime. The high efficiency separation between inertinite and vitrinite by the existing separation process needs to be improved, which includes improving the selectivity and reducing the separation density.

**Key words:** macerals; migration; component enrichment; vitrinite; inertinite

## 0 引言

我国的能源结构具有“富煤、贫油、少气”特点,

近年来我国原油对外依存度一直在 60% 以上。发展煤制油产业可有效缓解因富煤缺油给我国能源安全带来的挑战, 对保障国家能源安全具有重要的战

收稿日期: 2020-07-03; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.20070301

作者简介: 朱子祺 (1982—), 男, 江苏徐州人, 高级工程师, 博士, 主要从事选煤厂生产工艺管理和煤炭高质化利用研究工作。

E-mail: Studyzhu@163.com

引用格式: 朱子祺. 煤制油选煤厂煤显微组分迁移规律[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(6): 89-95.

ZHU Ziqi. Migration rule of coal macerals in coal-to-oil preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(6): 89-95.



移动阅读

略意义<sup>[1]</sup>。高品质原料煤是保障煤有效转化的基础,研究表明,原料煤的镜质组含量每提高10个百分点,油收率可提高4个百分点。因此煤岩富集是学者们研究的热点<sup>[2]</sup>。

由于煤岩富集对于原料内灰要求高,因此关于煤岩技术研究大多采用宁夏无烟煤和神东低阶煤。神东低阶煤具有氢含量高、反应活性高、内灰低等特点,是直接液化用煤的良好原料。陈洪博等<sup>[3]</sup>从动力学角度探讨了不同煤显微组分加氢液化性能及转化规律,研究认为神东煤镜质组和壳质组的转化速率为惰质组的2.6倍。神东低阶煤惰质组含量较高,文献<sup>[4]</sup>通过研究神东低阶煤镜质组富集,得到神东矿区低阶煤煤岩组分赋存规律及解离特征、重选、浮选及电选方法。

作为首批工业化实施的直接液化工程,神华煤制油公司的原煤来自补连塔2<sup>-2</sup>煤,煤制油选煤厂采用重介旋流器分选工艺生产灰分<5%的煤制油用原料煤。为提高煤制油转化率,神东洗选中心探索通过工艺升级生产高品质煤制油用原料煤,而了解煤制油选煤厂生产过程镜质组迁移规律是进一步提高煤制油原料煤品质的基础。现有研究主要集中在原煤的性质与富集方法<sup>[5]</sup>,对于选煤生产过程中煤岩组分的迁移情况鲜见系统研究。本文主要对煤制油选煤厂原料煤的镜质组、惰质组分布迁移进行系统分析,为实际生产过程优化提供了理论数据依据与指导。

## 1 原料煤基本性质

### 1.1 煤质分析

在原煤仓下采取代表性原煤样品,对神华煤制油选煤厂原煤进行煤质分析,见表1。

表1 煤的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal sample

元素分析/%					工业分析/%			
H <sub>daf</sub>	C <sub>daf</sub>	N <sub>daf</sub>	S <sub>t,d</sub>	O <sub>daf</sub>	M <sub>ad</sub>	A <sub>d</sub>	V <sub>daf</sub>	FC <sub>daf</sub>
4.71	66.41	1.66	0.35	13.45	8.68	9.61	36.11	63.89

从表1可以看出:①煤制油原煤为不黏煤,灰分为9.61%,属于低灰煤;②H/C比为0.84,根据国标GB/T 23810—2009《直接液化用原料煤技术条件》要求,直接液化原料煤的H/C比应大于0.75,可知煤制油选煤厂生产的产品属于良好的煤制油原料。

### 1.2 原煤及精煤表观形貌

取煤制油原煤中代表性煤块,煤层呈沥青光泽,

在镜煤条带呈弱玻璃光泽,阶梯状断口,贝壳状断口,在镜煤条带中,内生、外生裂隙发育,层状构造,半坚硬型,各煤层裂隙中均填充有黄铁矿、方解石脉,含菱铁矿鲕状结核,燃烧试验为剧燃,残灰灰白色,粉状<sup>[6]</sup>。将大颗粒煤块破碎至1 mm,并进行显微煤岩组分结构分析。煤制油选煤厂原煤、精煤显微组分形貌如图1所示。

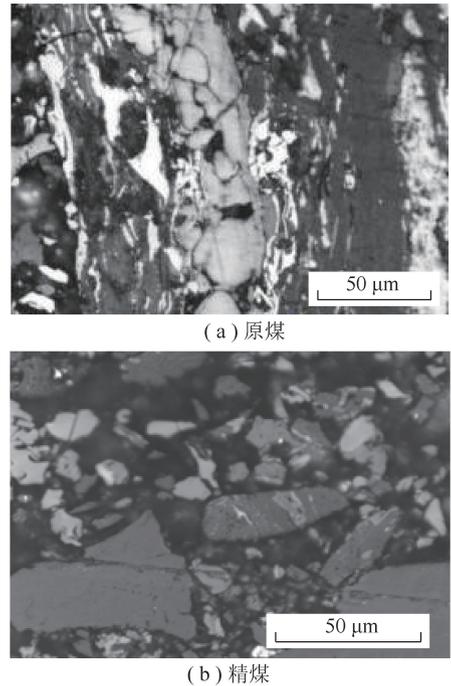


图1 煤制油选煤厂原煤和精煤显微组分形貌  
Fig.1 Maceral photos of raw coal and cleaned coal in coal-to-oil preparation plant

由图1(a)可以看出,原煤粒度较大,镜质组嵌布粒度较粗,但部分镜质组和惰质组未完全分离,部分惰质组仍嵌布在镜质组中,大块的镜质组与大块的惰质组紧密相连,需进一步破碎使镜质组与惰质组完全解离,但解离不仅增加了工艺复杂程度,也增加了生产成本,因此需结合原煤的镜质组密度分布及煤制油工艺要求,确定适宜的分选上限<sup>[7]</sup>。由图1(b)可以看出,精煤粒度较小,镜质组和惰质组解离程度较原煤高,大部分惰质组与镜质组分离,但仍有部分紧密嵌布,因此,进一步提高镜质组含量需经破碎、磨矿,使惰质组与镜质组全部解离<sup>[8]</sup>。

### 1.3 红外光谱分析

采用红外光谱法对原煤的官能团结构进行研究,通过比对推断煤样特定煤化程度的结构特性<sup>[9]</sup>。煤样红外光谱图如图2所示,图谱分析时扣除了背景和水蒸气的影响。由图2可知,原料煤在3 500、3 100 cm<sup>-1</sup>及其附近出现游离的—OH吸收峰

和分子内缔合的—OH吸收峰,此处的—OH以游离水和结合水的形式存在。在 $3\,420\text{ cm}^{-1}$ 及其附近的谱峰来源于一般羟基位置,说明羟基以多聚缔合态存在,煤分子结构中含有大量氢键,导致该缔合结构的产生<sup>[10]</sup>。

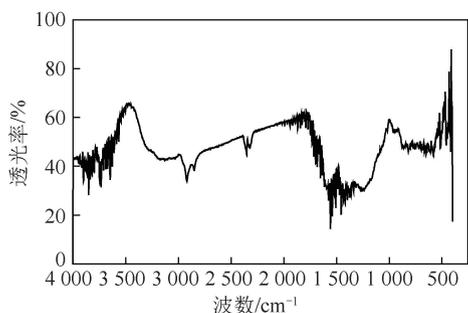


图2 煤制油选煤厂原煤红外光谱

Fig.2 Infrared spectrum of raw coal in coal-to-oil preparation plant

$1\,780\text{ cm}^{-1}$ 及其附近出现羰基吸收峰; $1\,000\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰由煤中灰分引起; $700\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 处主要为多种取代芳烃的面外弯曲振动

(称为芳香带),该谱带吸收峰的吸收强度相对较小,可推断煤中的芳香核较少。原料煤表面存在较多的含氧基团,氢含量较高,芳香核聚合程度低,这也是低阶煤的典型特征,氢含量高、芳香核数量少,有利于原料煤加氢转化,但表面含氧基团含量高,影响原煤的浮选性能,结合组分嵌布情况分析,要进一步提高精煤镜质组含量必须进一步实现煤岩解离,而解离后若采用浮选,则成本较高,可见神东煤制油选煤厂的原料性质决定了目前情况下重选为核心分选方法的现状<sup>[11]</sup>。

## 2 原料煤密度组成及组分分布

### 2.1 自然级浮沉及组分分布

根据 GB/T 478—2008 要求,分别取一定量的 $50\sim 25$ 、 $25\sim 13$ 、 $13\sim 6$ 、 $6.0\sim 0.5\text{ mm}$  粒度样品(由于本研究样品是毛煤经准备车间处理后的原煤,因此不存在 $>50\text{ mm}$  粒度),进行不同粒度 $1.3$ 、 $1.4$ 、 $1.5$ 、 $1.6$ 、 $1.8\text{ kg/L}$  密度级的浮沉试验,各粒度级、各密度级样品进行制样分析其组分分布,结果见表2和图3。

表2 原料煤浮沉试验结果及组分分布

Table 2 Density component test and component distribution of coal sample

粒度/mm	密度级/ ( $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	产率/%			含量/%	
		占本级	占全样	灰分	镜质组	惰质组
50~25	<1.3	27.05	2.88	4.31	72.30	27.70
	1.3~1.4	56.80	6.04	6.46	57.16	37.84
	1.4~1.5	2.85	0.30	12.34	36.42	56.78
	1.5~1.6	2.28	0.24	26.36	32.95	45.97
	1.6~1.8	4.27	0.45	38.66	25.24	34.35
	>1.8	6.75	0.72	70.53	15.24	24.35
25~13	<1.3	18.90	2.95	4.17	71.86	27.70
	1.3~1.4	71.22	11.12	7.01	57.36	40.84
	1.4~1.5	2.91	0.45	18.06	31.12	50.54
	1.5~1.6	1.65	0.26	26.34	24.95	50.97
	1.6~1.8	1.16	0.18	37.27	20.24	34.35
	>1.8	4.17	0.65	73.21	11.24	24.35
6~13	<1.3	39.02	5.36	2.97	73.01	26.73
	1.3~1.4	51.30	7.05	4.77	64.26	33.70
	1.4~1.5	1.88	0.26	18.06	27.45	55.54
	1.5~1.6	0.87	0.12	28.71	20.77	52.35
	1.6~1.8	1.01	0.14	40.40	12.42	44.35
	>1.8	5.92	0.81	67.19	8.86	42.35
6.0~0.5	<1.3	44.24	11.41	1.87	79.44	20.13
	1.3~1.4	45.58	11.76	4.27	61.16	38.10
	1.4~1.5	1.20	0.31	18.82	18.12	58.34
	1.5~1.6	0.94	0.24	30.98	10.77	62.50
	1.6~1.8	0.97	0.25	42.47	9.42	64.31
	>1.8	7.07	1.82	73.59	5.20	42.35

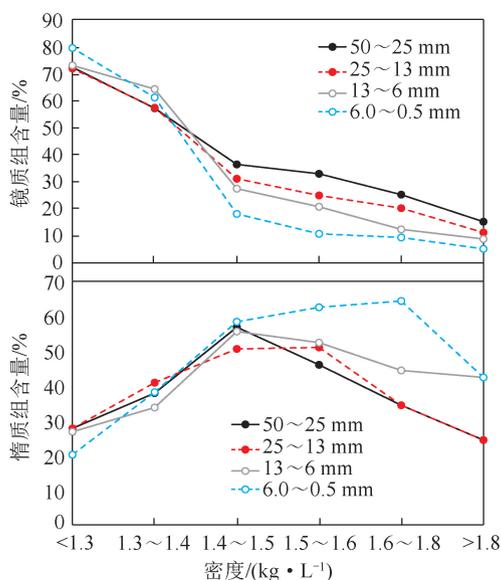


图3 镜质组、惰质组分分布

Fig.3 Distribution of inertinite and vitrinite

1) 不同粒度级的密度组成以 $<1.3$ 、 $1.3\sim 1.4$   $\text{kg/L}$ 为主,合计产率达83%以上,主导密度级为 $1.3\sim 1.4$   $\text{kg/L}$ ,产率在45%~71%,说明煤制油原料煤杂质含量少,有机质含量高。

2)  $<1.3$   $\text{kg/L}$ 密度计产率随粒度的降低逐渐由50~25 mm的27.05%增至6.0~0.5 mm的44.24%,灰分也相应降低,由4.31%降至1.87%,说明原料煤

粒度越细,解离程度越高,低密度组分释放产率多且杂质大量脱除。

3) 各粒度级不同密度级镜质组含量均随密度的增大而降低,说明镜质组主要集中在低密度级,提高镜质组含量的有效途径是对原料煤按密度分选。由于灰分和镜质组含量具有相关关系,因此通过系统研究建立灰分与镜质组含量的关系<sup>[12]</sup>。

4) 生产镜质组含量70%以上的高品质煤制油原料煤需要低密度分选环境,但低密度临近密度物含量均超过40%,属于极难选煤,且 $<1.3$   $\text{kg/L}$ 产率相对较低,因此需要进行破碎,降低分选上限。综上,高品质煤制油原料煤需降低分选上限,同时实现低密度高精度分选。

5) 煤制油原料煤不同自然级镜质组的密度分布规律表明,随密度增加,各粒度级的镜质组含量先显著降低,随后在1.5  $\text{kg/L}$ 后降幅减缓,而惰质组含量先快速增加,在1.5  $\text{kg/L}$ 后小幅降低。

## 2.2 破碎级浮沉及组分分布

分别取一定量的50~25、25~13、13~6、6.0~0.5 mm 粒度级样品,进行不同粒度级1.3、1.4、1.5、1.6、1.8  $\text{kg/L}$ 密度级的浮沉试验,各粒度级、各密度级样品进行制样分析其组分分布,结果见表3和图4,分析可知:

表3 破碎级浮沉试验结果及组分分布

Table 3 Density component test and component distribution of coal sample

粒度/mm	密度级/ ( $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	产率/%			含量/%	
		占本级	占全样	灰分	镜质组	惰质组
50~25	$<1.3$	29.61	3.49	3.45	73.30	26.70
	$1.3\sim 1.4$	60.69	7.15	6.16	57.66	43.05
	$1.4\sim 1.5$	3.84	0.45	16.61	29.92	58.45
	$1.5\sim 1.6$	0.77	0.09	24.07	31.96	52.97
	$1.6\sim 1.8$	0.77	0.09	33.45	25.44	36.30
	$>1.8$	4.32	0.51	71.15	13.24	24.35
25~13	$<1.3$	29.91	2.01	3.51	73.86	26.20
	$1.3\sim 1.4$	63.46	4.26	6.80	56.96	40.84
	$1.4\sim 1.5$	2.04	0.14	15.62	32.01	52.22
	$1.5\sim 1.6$	1.02	0.07	24.64	22.88	53.12
	$1.6\sim 1.8$	0.51	0.03	32.77	20.35	34.45
	$>1.8$	3.06	0.21	71.13	10.24	24.35
6~13	$<1.3$	31.03	0.99	3.28	72.50	26.73
	$1.3\sim 1.4$	59.04	1.88	5.60	59.26	38.70
	$1.4\sim 1.5$	2.07	0.07	12.78	27.45	60.54
	$1.5\sim 1.6$	0.69	0.02	23.37	20.77	52.35
	$1.6\sim 1.8$	0.69	0.02	31.24	12.42	44.35
	$>1.8$	6.48	0.21	68.27	8.86	42.35

续表

粒度/mm	密度级/ ( $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	产率/%			含量/%	
		占本级	占全样	灰分	镜质组	惰质组
6.0~0.5	<1.3	32.37	0.84	2.49	75.54	20.13
	1.3~1.4	52.01	1.34	5.44	61.21	38.10
	1.4~1.5	9.47	0.24	11.28	18.12	58.34
	1.5~1.6	1.05	0.03	31.57	10.77	62.50
	1.6~1.8	1.05	0.03	44.00	9.42	64.31
	>1.8	4.04	0.10	66.54	5.20	42.35

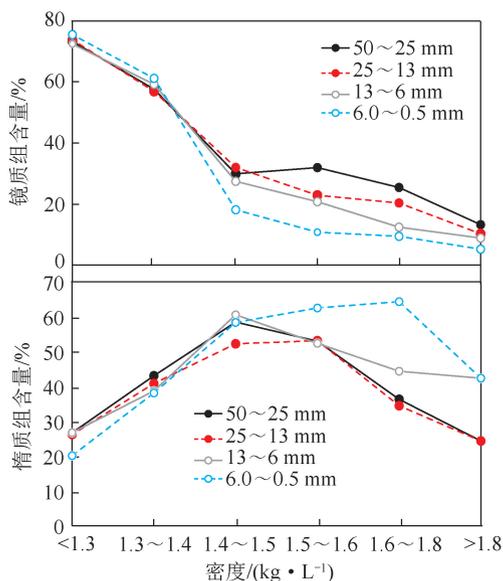


图4 镜质组、惰质组分分布

Fig.4 Distribution of inertinite and vitrinite

1) 不同粒度级的密度组成以<1.3、1.3~1.4 kg/L 为主,产率达 84% 以上,主导密度级为 1.3~1.4 kg/L,产率在 52%~64%,说明煤制油原料煤杂质含量少,有机质含量高。

2) 50~0.5 mm 范围内,随着粒度减小,灰分逐渐降低,说明原煤中有机质较脆,破碎过程中易向细粒度级富集;惰质组含量逐渐降低,说明惰质组机械强度相对较高,破碎过程中更易保留在粗颗粒中;镜质组含量呈逐渐升高趋势。随粒度降低,<1.3 kg/L 产率由 50~25 mm 的 29.61% 增至 6.0~0.5 mm 的 32.27%,灰分也相应降低,由 3.49% 降至 2.49%,说明原料煤粒度越细,解离程度越高,低密度组分释放产率多,且杂质大量脱除。

3) 随着密度增大,各粒度级镜质组含量均先快速降低后缓慢降低,说明镜质组主要集中在低密度级,提高镜质组含量的有效途径是对原料煤按密度分选。煤岩学分析表明,有机显微组分中一般镜质组密度较低,壳质组密度略低于镜质组,惰质组密度较高,而无机矿物密度最高<sup>[13]</sup>。因此随着分选密度

降低,首先脱除的是后生矿物为主的无机矿物;灰分降至后生矿物消失时,即外灰排除后,有机显微组分含量随着灰分的进一步降低迅速增加,因此镜质组含量随密度的变化趋势为:随着密度降低,镜质组含量线性升高,分选密度降至分选内灰所需密度以下时,镜质组含量迅速升高<sup>[14]</sup>。

4) 生产镜质组含量 70% 以上的高品质煤制油原料煤需低密度分选环境,但低密度临近密度物含量均超过 40%,属于极难选煤,且<1.3 kg/L 产率相对较低,因此需要进行破碎降低分选上限。综上,高品质煤制油原料煤需降低分选上限,同时实现低密度高精度分选。

5) 煤制油原料煤不同破碎级镜质组的密度分布规律表明,随着密度增加,各粒度级镜质组含量先显著降低,在 1.5 kg/L 后降幅减缓;惰质组含量先快速提升,1.5 kg/L 后小幅降低。

### 3 生产过程组分分布规律

在生产稳定运行情况下,取煤制油选煤厂关键生产节点代表性样品,对煤样进行缩分、制样灰分、组分组成分分析,结果见表 4 和图 5。

1) 神东矿区重介原煤灰分为 9.45%,镜质组含量为 58.11%,惰质组含量为 37.52%;精煤灰分为 5.09%、5.40%,镜质组含量为 63.09%、62.42%,惰质组含量为 35.31%、35.97%。说明经重介分选后,镜质组含量提高 15 个百分点,灰分降低 4 个百分点,虽镜质组含量显著提高,但要升至 70% 以上需二次精选。

2) 随着流程走向,筛分对于组分含量的变化影响不大,而分选对于组分含量的变化影响显著。

3) 粗煤泥中镜质组含量为 57.09%~59.09%,而细煤泥镜质组含量为 45.45%,说明粗煤泥中有一定量的镜质组需回收,应加强对粗煤泥中镜质组资源的回收利用,扩大煤制油原料的来源。

表4 煤制油选煤厂流程取样

Table 4 Flow sampling information of coal-to-oil preparation plant

样品	取样点	含量/%							
		灰分	镜质组	惰质组	壳质组	有机质	黏土类	硫化物	碳酸盐
块原煤	1209 筛上	9.70	57.31	39.42	0.82	99.00	0.56	—	0.44
末原煤	1209 筛下	9.32	57.40	40.74	1.86	97.00	1.20	1.20	0.60
重介入料	1301 胶带机上	9.45	58.11	37.52	0.59	98.00	0.61	0.86	0.53
重介精煤	1308 脱介筛筛上	5.09	63.09	35.31	2.27	95.46	1.70	1.14	1.70
重介精煤	1309 脱介筛筛上	5.40	62.42	35.97	1.61	98.80	0.60	—	0.60
矸石	矸石脱介筛筛上	58.00	17.14	81.95	0.91	52.28	31.02	—	16.70
粗煤泥	水力旋流器底流	10.65	57.09	38.31	1.60	95.46	1.70	1.14	1.70
粗煤泥	1329 刮板	8.78	59.09	40.26	1.65	95.66	2.48	—	1.86
细煤泥	1343 刮板	16.62	45.45	52.28	1.86	85.46	9.45	—	5.09

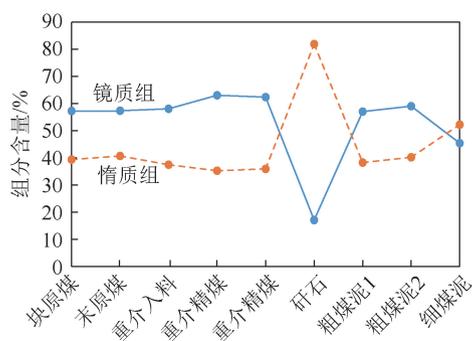


图5 煤制油选煤厂流程样组分分布

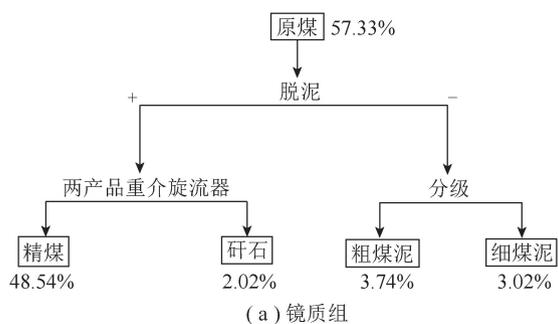
Fig.5 Component distribution of flowsheet samples in coal-to-oil preparation plant

图6为镜质组和惰质组的迁移情况,可以看出,镜质组中,88%进入重介精煤,7%进入粗煤泥产品,5%进入细煤泥产品。由于细煤泥回收难度极大,而粗煤泥技术成熟,因此粗煤泥回收镜质组是可行的;惰质组中,59%进入重介精煤中,25%进入矸石,7%进入粗煤泥产品,9%进入细煤泥产品。说明现有分选工艺对惰质组与镜质组的高效分离有待提高,如需提高分离效果,应提高选择性和降低分选密度<sup>[15]</sup>。

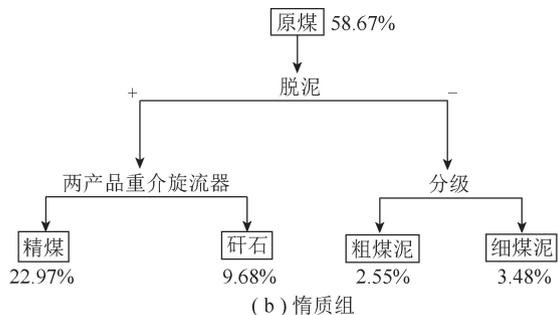
## 4 结论

1)各粒度级不同密度级镜质组含量均随密度的增大而降低,说明镜质组主要集中在低密度级,提高镜质组含量的有效途径是对原煤按密度分选。

2)通过红外光谱分析,原煤表面存在较多的含氧基团,氢含量较高,芳香核聚合程度低,表面含氧基团含量高,影响原煤的浮选性能,结合组分分布情况分析,要进一步提高精煤镜质组含量,必须充分的煤岩解离并进行浮选,但其成本较高,还需进一步从经济性方面考虑。



(a) 镜质组



(b) 惰质组

图6 煤制油选煤厂镜质组和惰质组迁移情况

Fig.6 Migration of vitrinite and inertinite in coal-to-oil preparation plant

3)从镜质组迁移情况看,88%进入重介精煤,7%进入粗煤泥产品,5%进入细煤泥产品,粗煤泥中镜质组含量为57.09%~59.09%;而细煤泥镜质组含量为45.45%,说明粗煤泥中还有一定量的镜质组需回收,应加强对粗煤泥中镜质组资源的回收利用,扩大煤制油原料的来源。

## 参考文献 (References):

- [1] 胡波,陶秀祥,王市委,等.煤岩组分解离及其检测方法[J].选煤技术,2011(3):4-7.  
HU Bo,TAO Xiuxiang,WANG Shiwei,et al.Research on liberation and detection method of maceral[J].Coal Preparation Technology, 2011(3):4-7.

- [2] 孙南翔.扎哈淖尔煤不同煤岩组分的热解破碎粉化特性[J].煤质技术,2019,34(2):16-19.  
SUN Nanxiang. Thermal fragmentation and pulverization characteristics of Zaha Nur coal during pyrolysis process [J]. Coal Quality Technology, 2019, 34(2): 16-19.
- [3] 陈洪博,郭治.神东煤不同显微组分加氢液化性能及转化规律[J].煤炭转化,2006,29(4):9-12.  
CHEN Hongbo, GUO Zhi. Study on hydroliquefaction behaviour and rules of Shendong coal macerals [J]. Coal Conversion, 2006, 29(4): 9-12.
- [4] YE Daomin, HUO Linhe. Brown coal's macerals and liquefying properties with hydrogen [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(6): 1-4.
- [5] 韩德鑫.中国煤岩学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996.  
HAN Dexin. Coal petrologic of China [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996.
- [6] 段旭琴,王祖训,孙春宝.神府煤显微组分表面性质研究[J].中国矿业大学学报,2007,36(5):630-635.  
DUAN Xuqin, WANG Zune, SUN Chunbao. Surface properties of macerals from Shenfu coal [J]. Journal of University of Mining & Technology, 2007, 36(5): 630-635.
- [7] DYRKACZ G R, HORWITZ E P. Separation of coal macerals [J]. Fuel, 1982, 61(1): 3-12.
- [8] 李小彦.论煤岩组分的液化性能[J].煤田地质与勘探,2010,38(3):1-5.  
LI Xiaoyan. Discussion on liquefaction reactivity of lithotype and maceral of low rank coal [J]. Coal Geology & Exploration, 2010, 38(3): 1-5.
- [9] 白云起,白青子,赵宪德.基于煤岩组分和镜质组反射率的焦炭质量预测模型[J].黑龙江科技大学学报,2018,28(3):249-252.  
BAI Yunqi, BAI Qingzi, ZHAO Xiande. Prediction model of coke quality based on coal components and vitrinitereflectance [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2018, 28(3): 249-252.
- [10] 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.
- [11] 李德平,姚伯元,张代林,等.不同变质程度煤镜质组活性质量研究[J].煤炭学报,2013,38(10):1862-1867.  
LI Deping, YAO Boyuan, ZHANG Dailin, et al. Study on vitrinite activity quality in different metamorphic grade coals [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1862-1867.
- [12] 邢宝林,郭晖,湛伦建,等.煤岩显微组分对活性炭孔结构及电化学性能的影响[J].煤炭学报,2014,39(11):2328-2334.  
XING Baolin, GUO Hui, CHEN Lunjian, et al. Effects of coal macerals on the pore structure and electrochemical performances of activated carbon [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(11): 2328-2334.
- [13] 忻仕河,徐振刚.大同煤不同显微组分富集物焦与CO<sub>2</sub>反应性研究[J].煤炭转化,2004,27(4):13-16.  
XIN Shihe, XU Zhengang. Research into reactivity of char from coal maceral concentrates during gasification with CO<sub>2</sub> [J]. Coal Conversion, 2004, 27(4): 13-16.
- [14] 门东坡.气煤煤岩组分破碎解离及其富集物配煤炼焦规律研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2017.  
MEN Dongpo. Study on the maceral crushing and liberation and on the coal blending coking for gas coal [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.
- [15] 郑学召,赵炬,张铎,等.不同变质程度煤介电常数特性[J].西安科技大学学报,2019,39(3):469-474.  
ZHENG Xuezhao, ZHAO Ju, ZHANG Duo, et al. Dielectric constant characteristics of different metamorphic coals [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(3): 469-474.