

# 泡沫浮选从煤中分离微矿物的研究

Saroj Kumar Sahoo<sup>1,\*</sup>, Nikkam Suresh<sup>1</sup>, Atul Kumar Varma<sup>2</sup>

1 印度 丹巴德 印度理工学院 (印度矿业学院) 燃料与矿产工程系

2 印度 丹巴德 印度理工学院 (印度矿业学院) 应用地质系

**摘要:** 在过去, 煤显微组分的分离是基于密度差进行的, 例如沉浮分析、密度梯度离心 (DGC) 技术等。这些方法的成功有限。泡沫浮选是一种物理化学过程, 根据容器中表面财产的差异, 在由两个不同区域 (即矿浆区和泡沫区) 组成的容器中分离颗粒。单个尺寸范围颗粒的可浮性随其灰分百分比和存在的显微组分含量而变化。因此, 浮选速率常数最终成为煤颗粒显微组分百分比的函数。在本论文中, 通过使用亚烟煤级煤进行粒度浮选试验进行了尝试, 并根据不同浮选时间间隔精矿的显微组分百分比报告建立了浮选动力学。这些结果与该过程的动力学行为有关。

**关键词:** 煤炭浮选; 浮选动力学; Macerals 公司

## Studies on Separation of Macerals from Coal by Froth Flotation

Saroj Kumar Sahoo<sup>1,\*</sup>, Nikkam Suresh<sup>1</sup>, Atul Kumar Varma<sup>2</sup>

1Department of Fuel and Mineral Engineering, Indian Institute of Technology (Indian School of Mines), Dhanbad, India

2Department of Applied Geology, Indian Institute of Technology (Indian School of Mines), Dhanbad, India

**Abstract:** In the past coal maceral separation have been carried out based on density difference e.g., sink-float analysis, density gradient centrifugation (DGC) techniques etc. These approaches are of limited success. Froth flotation is a physicochemical process separating particles on the basis of difference in surface properties in a vessel consisting of two distinct zones viz., pulp and froth zones. Rate of floatability of individual size range particles varies with their ash percent and the maceral content present. Therefore, the flotation rate constant eventually becomes a function of maceral percentage of a coal particle. In the present paper, an attempt has been made by performing size-wise flotation tests using a sub-bituminous rank coal and flotation kinetics have been established based on maceral percentage reporting to concentrate at different time intervals of flotation. These results have been related to the kinetic behaviour of the process.

**Keywords:** Coal flotation; Flotation kinetics; Macerals

### 1. 引言

煤显微组分可以定义为显微可识别的有机组分, 没有明确的晶体结构和化学成分。这些显微组分通常分为三大显微组分, 如镜质体、脂质体和惰质体。每组代表特定等级煤中具有类似财产 of 的显微组分<sup>[1]</sup>。采用了几种选矿技术来浓缩显微组分, 如泡沫浮选<sup>[2-5]</sup>、磁分离<sup>[6]</sup>和静电分离<sup>[7]</sup>等。除泡沫浮选技术外, 由于技术经济因素, 其他技术均未获得任何认可。通过使用离心技术考虑显微组分的重量差异, 也取得了一些成功<sup>[8]</sup>。泡沫浮选是由固相、水相和气相三个阶段组成的物理化学过程。它由两个不同的区域组成, 如浆区和泡沫区。在纸浆区, 矿物颗粒附着在气泡上并转化为泡沫区。泡沫回收在泡沫阶段起着重要作用, 因为它决定了有价值矿物的回收率。泡沫回收主要受气泡聚结和排水的影响<sup>[9]</sup>。泡沫区

是一个非常复杂的区域, 受到固体浓度、颗粒形状、尺寸和疏水性等多种因素的影响。泡沫浮选是精煤选矿的过程, 因为它取决于煤的表面财产<sup>[10]</sup>。Arnold 和 Aplan 测量了几个煤样品的接触角, 以量化单个煤显微组分的疏水性。发现煤显微组分的疏水性顺序为脂质体 > 镜质体 > 惰质体, 这些显微组分具有典型的接触角范围, 分别为 90-130°、60-70° 和 25-40°<sup>[11]</sup>。在另一项研究中, 显微组分按浮选速率排列, 如脂质体 > 镜质组 > 惰质组, 惰质组和镜质组的典型富集值为 0.118sec<sup>-1</sup><sup>[4]</sup>。R、Q.Honaker, 使用柱浮选技术分离显微组分。在本研究中, 他们从伊利诺伊州 6 号煤层中采集了尺寸为 50mm 的煤样, 其灰分、硫、矿物质、镜质组、脂质组、惰质组的含量分别为 8.3%、1.1%、9.50%、79.10%、3.90% 和 7.50%。实验室柱浮选用于选矿<sup>[15]</sup>。对浮选进料、精矿和尾矿样品进行了沉浮技术和离心技术, 并计算了三个测量组的

浮选速率动力学 (k)<sup>[2]</sup>。哈德格罗夫可磨性指数 (HGI) 与煤显微组分最直接相关, 但也取决于煤的等级。一些研究人员已经研究了可磨性和煤岩石学之间的关系。他们发现, 随着煤中脂质体浓度的增加, HGI 值降低, 并且与镜质体百分比有直接关系。Hower 和 wild 发现, 对于镜质组反射率范围较窄的煤, 脂质体含量的增加与 HGI 的降低之间存在强烈的相关性<sup>[16]</sup>。在本文中, 尝试使用煤的次烟煤级进行粒度浮选试验, 并根据不同浮选时间间隔的材料百分比报告建立了浮选动力学。因此, 浮选速率常数最终是煤颗粒显微组分百分比的函数。煤炭样品取自印度贾坎德煤矿, 目的是确定在 -500+150、-150+75、-75+36、-36+25 和 -25 微米的不同粒级中分离显微组分的可能性, 并用粒级研究浮选速率常数。

## 2. 实验

### 2.1 样品制备、筛选和群体宏观分析

煤炭样品取自印度贾坎德煤矿, 并分离出 -500 微米粒级的部分, 用于进一步研究。在 -500+150、-150+75、-75+40、-40+25 和 -25 微米处对 -500 微米级的煤样品进行湿筛。可以看出, 大部分煤粒分布在较粗粒级 (-500+150, -150+75) 之间 [表 1]。根据 ASTM D3174-73 标准方法对保留在每个馏分上的样品进行灰分分析。随后, 根据 ICCP 标准方法制备了 15 个子样品并用于抛光部分的制备。根据 ISO 7404-3 标准方法, 使用显微研究进行显微组分分析, 即镜质体、惰质体和脂质体的测定。样品的近距离和岩相分析如表 2 所示。根据工业分析, 很明显所用的煤是高灰煤。

### 2.2. 浮选研究

浮选试验在 6 升容量的实验室间歇浮选池中进行, 该池具有改变转速、刮刀速度和叶轮高度的设施。图片, 分别为  $0.113\text{sec}^{-1}$  和  $0.112\text{sec}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。此外, 他们报告了一些研究, 这些研究检查了显微组分或岩石类型划分, 通常不考虑显微组分的关联<sup>[13]</sup>。王等人研究了神府煤显微组分的可浮性, 并试图通过微波辐射改变其可浮性。他们发现, 神府镰刀菌素和神府玻璃体的表面润湿性差异增加, 随后使用的机器视图增加, 如图 1 所示。进行粒度浮选并收集时间泡沫。绘制浮选回收率和时间值, 以确定每个时间段内的速率常数, 并用速率常数绘制不同粒径分数。进行了时间灰分分析。具有可变参数的实验是纸浆密度、试剂剂量, 固定参数是 rpm、叶轮高度和空气流速。这些试剂被用作柴油作为捕收剂, 松油作为起泡剂。在加入任何收集器和起泡剂剂量之前, 将纸浆调节 120 秒。加入收集器后, 调节时间为 60 秒, 起泡剂调节时间为 30 秒。空气阀、刮刀开关和水流量锁一次打开。水的流速保持了电解槽的纸浆液位。以 1000 的固定 RPM 搅拌纸浆。所有实验均在约 8 的自然 PH 下进行。所有实验都使用了丹巴德自来水。在 60°C 的固定温度下, 将时间漂浮 (精矿) 馏分和非漂浮 (尾矿)

馏分在烘箱中干燥, 然后加权以计算产率。在累积时间 (例如 5、15、30、60 和 90 秒) 收集泡沫馏分。



图 1. 实验室浮选池方案。

### 2.3. 区块准备

将每种尺寸和时间泡沫级分获得的样品安装在不同的块中进行岩相分析。煤样抛光部分制备所采用的程序简要解释如下:

- (1) 将所需数量的样品进行润滑安装锤击。
- (2) 将约 1:2 比例的硬化剂和环氧树脂 (M/s Buehler 制造) 倒入锤中, 直至体积的一半。
- (3) 在彻底混合样品和树脂硬化剂的混合物后, 用树脂硬化剂稀释混合物填充剩余部分, 使其完全固化。
- (4) 从锤击中取出试样, 贴上标签, 然后按照 ICCP 标准方法进行研磨和抛光<sup>[17]</sup>。

### 2.4. 岩石学研究

使用 -0.5 mm 大小的煤样品制备颗粒, 并在反射光下使用 “LEICA DM2700P” 显微镜进行研究, 该显微镜带有油浸透镜和荧光附件, 设置如图 2 所示, 位于印度达恩巴德印度矿业学院应用地质系煤炭地质和有机岩石学实验室, 遵循标准程序<sup>[17]</sup>。显微组分根据 ICCP 显微组分分类进行鉴定<sup>[18-19]</sup>。制备了原料煤颗粒、浮选精矿和浮选尾矿的抛光部分 (2cm×2cm×2cm 模具), 并用反射光显微镜进行了研究。在每种情况下, 本研究中统计了大约 400-500 个颗粒。样品在 200 倍和 500 倍放大率下进行研究。在这项研究中, 组显微组分是基于纯有机基础进行计数的, 即镜质体 + 脂质体 + 惰质体 = 100%。

## 3. 结果和讨论

### 3.1. 进料和不同粒度馏分的表征

煤粉的粒度分布和相应的灰分含量如图 3 所示。从图中可以清楚地看出, 煤在前两种粒级中的分布更多。在进料煤样品中, 镜质体组显微组分占主导地位, 其次是脂质体组显微组分。镜质体组中, 胶粒组是最明显的显微组分。

在一级粒级中, 镜质体更为明显。随着粒度的减小, 矿物质百分比和黄铁矿百分比增加。在中等粒级中, 三镁石(镜质组+脂质组+惰质组)颗粒的存在非常普遍。随着样品尺寸的减小, 镜质体百分比增加, 脂质体含量减少, 如表3和图4所示。



图2. 配有与计算机相连的油浸透镜的岩相学装置。

size (μ)	wt. (g)	wt.%	ash%	cum wt.% retained	cum wt.% passing
-500+150	1026	55.76	42.14	55.76	44.24
-150+75	285	15.49	41.14	71.25	28.75
-75+40	165	8.97	38.85	80.22	19.78
-40+25	84	4.57	41.02	84.78	15.22
-25+0	280	15.22	44.81	100.00	0.00

表1. 进料煤样品的粒度和粒度灰分分布。

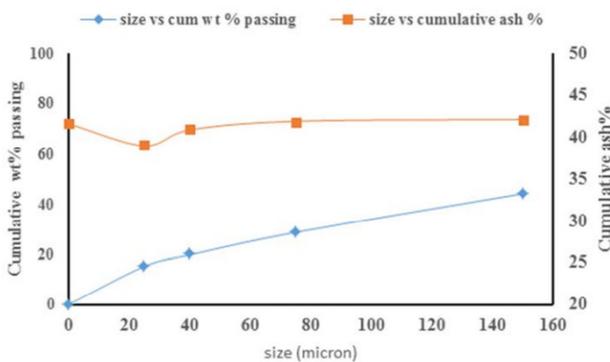


图3. 煤粉和灰分在不同粒级中的分布。

Proximate analysis	Weight %	Petrographic analysis	Volume %
Moisture	0.50	Vitrinite	73.28
Volatile Matter	28.72	Liptinite	15.74
Ash	42.14	Inertinite	10.25
Fixed Carbon	28.65	Mineral Matter	0.68
		Pyrite	0

表2. 进料煤粉的近似和岩相分析。

Size (μ)	vitrinite	liptinite	inertinite
-500+150	73.79	15.86	10.34
-150+75	78.23	8.00	20.00
-75+40	81.51	1.26	13.09

表3. 煤样不同粒级的岩相组成。

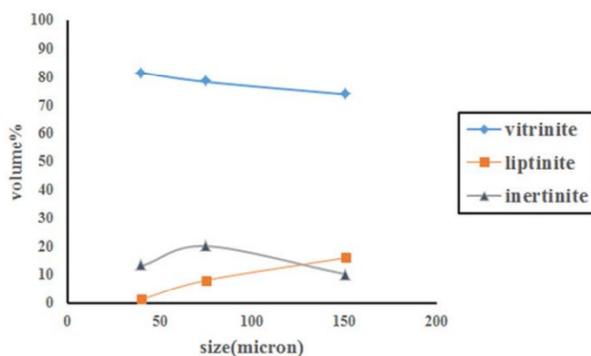


图4. 镜质组、惰质组和脂质组随粒度分数的变化。

### 3.2. 不同时间泡沫浓缩物的显微特征

用常规点计数器程序计算不同时间泡沫浓缩物的总体分布, 图5和图6以体积百分比表示。从图中可以观察到, 大约80%的镜质体组显微组分在前10秒内漂浮。镜质体组中, 胶粒组是主要的显微组分。随着时间的推移, 镜质体组显微组分的百分比降低, 而惰质组显微组份增加, 仅在60秒时出现偏差。在泡沫的不同持续时间观察到的图像显微照片如图6所示。表4和表5显示了随着泡沫收集时间的增加, 两种粒级的矿物质百分比和黄铁矿百分比增加。在不同的时间段内, 发现了惰质岩组显微组分(即半丝质体和丝质体)和脂质岩组显微组分(如孢子体)以及小而宽的角质层带的完全释放。在不同的泡沫组分中广泛发现了惰质岩组的细晶岩和细晶岩显微组分。

Time	v	l	i	mm	pyrite	cum ash%	ash%
0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
5	77.62	12.3	8.69	2.05	0	32.77	32.77
15	73.47	6.94	14.33	4.78	0.43	33.59	34.80
30	63.86	12.89	14.83	7.09	1.29	33.72	34.12
60	72.21	7.4	11.1	8.34	1.92	35.70	42.61
90	48.92	15.94	13.81	18.08	3.19	36.44	50.11
tailings	47.81	5.31	8.49	25.53	12.76	42.01	64.52

表4. 显示了粒度为-500+150μ时的岩相成分变化。

Time	v	l	i	mm	pyrite	ash%	cum ash%
0	0	0	0	0	0	0	0.00
5	71.14	1.97	17.38	7.9	1.5	34.02	34.02
15	61.5	0.34	25.76	9.62	2.96	32.88	33.52
30	60.01	4	22.01	0	4	43.19	34.81
60	78.17	7.27	10.89	3.63	0	49.67	35.70
90	48	12	16	20	4	41.61	35.81
tailings	78.87	8.45	8.43	4.22	0	57.95	41.72

表5. 显示了粒度为-74+36μ时的岩相成分变化。

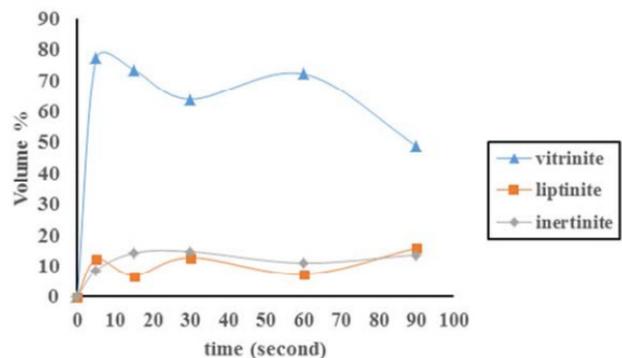


图5. 显示大小为-500+150μ的泡沫中显微组分的时间变化。

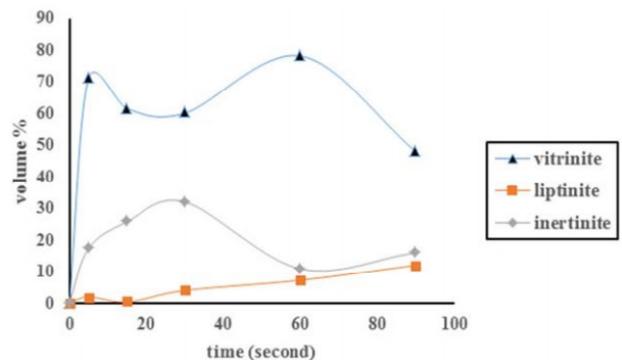


图6. 显示大小为-74+36μ的泡沫中显微组分的时间变化。

### 3.3. 部件分区和速率常数

图7. 是-500+150μ粒度的累积组分回收率与浮选时间的关系图。该图显示, 对于该粒级, 释放的镜质体组

分具有最高的浮选率和最终回收率。其次是富含惰质组分，其浮选率和最终回收率低于镜质体。具有最低浮选率和最终回收率的组分是脂质体。

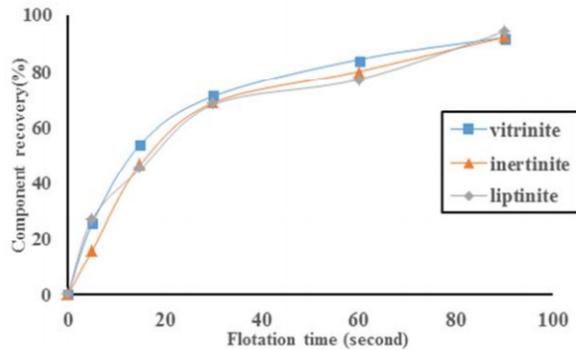


图 7.-500+150 $\mu$  粒级煤不同显微组分的浮选动力学。

图 8 显示了 -74+36 $\mu$  中等粒级的累积组分回收率随浮选时间的变化。在该粒级中，惰质组分的回收率和最终回收率高于镜质组分。与粗粒级不同，它们仅略高于惰质组分和镜质组分。脂质体组分的回收率和最终回收率显著低于镜质组分和富含惰质组分。对于该中等粒级，镜质体的回收量明显高于粗粒级 -500+150 $\mu$ 。

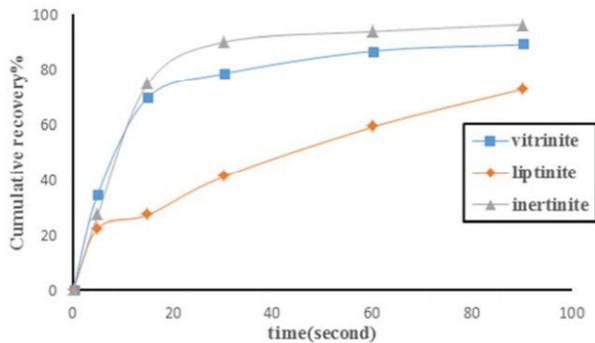


图 8.-74+36 $\mu$  粒级煤不同显微组分的浮选动力学。

通过使用非线性最小二乘法将实验数据拟合到一级浮选模型，从动力学数据中提取了两种粒度级分的不同显微组分的浮选速率常数和最终回收率，如表 6 所示。

Size fraction	Maceral	Flotation rate constant (k)	Ultimate recovery (R <sub>∞</sub> )
-500+150 $\mu$	Vitrinite	0.046	95.6
	Inertinite	0.043	95.0
	Lipinite	0.042	92.3
	Total	0.046	85.0
-74+36 $\mu$	Vitrinite	0.068	90.0
	Inertinite	0.083	98.0
	Lipinite	0.026	75.0
	Total	0.090	81.0

表 6. 显示显微组分的动力学参数。

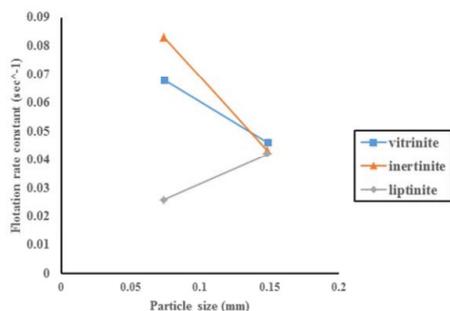


图 9. 煤显微组分的浮选速率常数与粒度。

图 9 表明，随着粒度的增加，镜质组和惰质组的浮

选速率以恒定的方式降低，但在脂质组分的情况下会发生偏差。

#### 4. 结论

以下是上述研究得出的结论。

(i) 随着粒度的减小，镜质组和惰质组分的速率常数减小。

(ii) 对于较粗粒级分，游离镜质组分的浮选速率常数和最终回收率高于惰质组分。

(iii) 对于细粒级分，惰质组分的回收率和最终回收率高于镜质组分。

(iv) 最后，可以得出结论，从 -500+150 $\mu$  粒级中回收了大量镜质体组分。

#### 参考文献

- [1] Jiménez, A., Iglesias, M. J., Laggoun-Défarge, F., & SuarezRuiz, I. (1998). Study of physical and chemical properties of vitrinites. Inferences on depositional and coalification controls. *Chemical Geology*, 150(3), 197-221.
- [2] Yerriswamy, P., Modi, O. P., Rao, K. K., & Rao, T. C. (2000). Characterization of Macerals in Coal Fines using Image Analysis Technique.
- [3] Honaker, R. Q., Mohanty, M. K., & Crelling, J. C. (1996). Coal maceral separation using column flotation. *Minerals Engineering*, 9(4), 449-464.
- [4] Sarkar, G. G., Ghose, S., Chaudhuri, S. G., Sakha, S., & Daschowdhury, K. P. (1984). Selectivity of coal macerals during flotation and oil agglomeration: a case study. *Coal Perparation*, 1(1), 39-52.
- [5] Shu, X., Wang, Z., & Xu, J. (2002). Separation and preparation of macerals in Shenfu coals by flotation. *Fuel*, 81(4), 495-501.
- [6] Tempelmeyer, K. E., Crelling, J., Hippo, E., Paul, B., & Yen, M. (1991). Coal refining by maceral liberation and separation. In annual international pittsburgh coal conference (pp. 329-336). University of pittsburgh school of engineering centre for energy.
- [7] Crelling, J. C. (1989). Separation and characterization of coal macerals: accomplishments and future possibilities. *Prepr. Pap., Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.*; (United States), 34 (CONF-8904170-).
- [8] Dyrkacz, Gary R., Carol AA Bloomquist, and Ljiljana Ruscic. "Chemical variations in coal macerals separated by density gradient centrifugation." *Fuel* 63, no. 8 (1984): 1166-1173.
- [9] Jorjani, E., Esmaili, S., & Khorami, M. T. (2013). The effect of particle size on coal maceral group's separation using flotation. *Fuel*, 114, 10-15.
- [10] Laskowski, J. S. (2001). Fine-coal utilization.

Developments in Mineral Processing, 14, 307-351.

[11] Arnold, B. J., & Aplan, F. F. (1989). The hydrophobicity of coal macerals. *Fuel*, 68(5), 651-658.

[12] Sahoo, S. K., Suresh, N., & Varma, A. K. (2017). Kinetic studies on petrographic components of coal in batch flotation operation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 1-22.

[13] Hower, J. C., Kuehn, K. W., Parekh, B. K., & Peters, W. J. (2000). Maceral and microlithotype beneficiation in column flotation at the powell mountain coal mayflower preparation plant, Lee County, Virginia. *Fuel processing technology*, 67(1), 23-33.

[14] Shu, X., Wang, Z., & Xu, J. (2002). Separation and preparation of macerals in Shenfu coals by flotation. *Fuel*, 81(4), 495-501.

[15] Honaker, R. Q., Mohanty, M. K., & Crelling, J. C. (1996). Coal maceral separation using column flotation. *Minerals engineering*, 9(4), 449-464.

[16] Jorjani, E., Hower, J. C., Chelgani, S. C., Shirazi, M. A., & Mesroghli, S. (2008). Studies of relationship between petrography and elemental analysis with grindability for Kentucky coals. *Fuel*, 87(6), 707-713.

[17] Taylor, G. H., Teichmüller, M., Davis, A. C. F. K., Diessel, C. F. K., Littke, R., & Robert, P. (1998). *Organic petrology*.

[18] ICCP, I. (2001). *Handbook Coal Petr. suppl. to 2nd ed. ICCP. 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994)*. *Fuel*, 77, 349-358.

[19] For Coal, I. C. (1998). *The new vitrinite classification (ICCP System 1994)*. *Fuel*, 77(5), 349-358.