

文章编号: 1001-3571 (2023) 06-0054-12

煤岩有机显微组分分离富集的意义及其研究现状

邓明瑞^{1,2}, 刘红娜^{1,2}

(1. 中煤科工集团唐山研究院有限公司, 河北唐山 063012; 2. 河北省煤炭洗选工程技术研究中心, 河北唐山 063012)

摘要: 传统选煤, 主要关注煤炭的脱硫降灰, 目前技术已十分成熟。为寻找煤炭洗选新的技术经济增长点, 基于煤岩有机显微组分在颜色、形态、元素组成、分子结构、硬度和脆度、密度、表面性质等方面的差异, 综述了煤岩有机组分在不同用途中性能的差异以及分离、富集的意义: 炼焦方面, 若将大量赋存的低阶烟煤中的镜质组分离、富集后做配煤炼焦, 将大大扩展炼焦煤原料的来源, 有效降低对外部的依赖; 液化方面, 镜质组和壳质组的转化速率和油收率明显高于惰质组, 若能将其有效富集, 无疑将对煤的直接液化以及整个煤炭液化行业起到促进作用; 其他方面, 如燃烧、制作碳素材料等等, 显微组分间的分离、富集也意义较大, 是精细分质利用的前提。因而, 煤岩有机显微组分分离、富集方面的研究尤为重要, 常用方法包括手选、图像识别分选、重选、浮选、电选等, 其中重选、浮选相对而言更加成熟; 但目前分离、富集方法的研究, 解离时过于注重解离度, 导致后续分选环节的入料粒度偏细、分选难度大、成本高, 且不利于后续产品利用。分析认为, 应重视图像识别分选和分选原料选择, 提出了阶段解离、阶段富集的整体分选思路, 可在保证效果的同时降低生产成本, 进一步促进有机显微组分分离、富集的发展。

关键词: 煤炭分选; 煤岩有机显微组分; 物化性质; 炼焦; 液化; 解离; 图像识别; 浮选

中图分类号: TD94; TQ53

文献标志码: A

Significance of separation and enrichment of organic coal macerals and status quo of related research work

DENG Mingrui^{1,2}, LIU Hongna^{1,2}

(1. CCTEG Tangshan Research Institute Co. Ltd., Tangshan 063012, China; 2. Hebei Province Coal Engineering & Technology Research Center, Tangshan 063012, China)

Abstract: Traditional coal cleaning operations are proceeded with the stress centered on sulfur removal and ash reduction, and the technologies applied are quite mature in the current stage. With an aim to explore the new techno-economical growth point in coal preparation, the paper presents general survey of the different properties of macerals required by different sectors to illustrate the significance in making separation and enrichment of coal macerals. The technical survey is made based on the difference of macerals in color, form, elementary composition, molecular structure, hardness, frangibility, density, surface property, etc. It is noted that for the coking sector, the use of the separated and enriched tellinite, which is in mass occurrence in low-rank bituminous coal, as a coking blend can greatly expanded the sources of coking coal materials, and hence reduce the reliance on supply of the materials from external sources; for the coal liquefaction sector, the effective enrichment of the tellinite and liptinite which can yield a higher conversion rate and oil recovery than tellinite can undoubtedly play a significant role in promoting the direct liquefaction of coal and the whole coal liquefaction sector; and in the case of using macerals as fuel or for making carbon, the separation and enrichment of macerals is also of vi-

收稿日期: 2023-06-30 责任编辑: 李梅 DOI: 10.16447/j.cnki.cpt.2023.06.007

作者简介: 邓明瑞(1989—), 男, 黑龙江五大连池人, 工程师, 硕士, 从事选煤工艺及浮选装备的技术研究。E-mail: dengming123shan@163.com, Tel: 15830504229。

引用格式: 邓明瑞, 刘红娜. 煤岩有机显微组分分离富集的意义及其研究现状[J]. 选煤技术, 2023, 51(6): 54-65.

DENG Mingrui, LIU Hongna. Significance of separation and enrichment of organic coal macerals and status quo of related research work[J]. Coal Preparation Technology, 2023, 51(6): 54-65.

tal importance because it is prerequisite for utilization of the macerals according to well-defined quality standards. The research and development of the macerals separation and enrichment technologies is of particularly paramount importance. The methods commonly used include handpicking, image identification, heavy-medium separation, flotation and electrical concentration, out of which the heavy-medium separation and flotation methods are more matured in technology. The research work is currently made, however, with excessive stress on degree of liberation of intergrown constituents, causing as a result the difficulty and high cost of the subsequent processing links in treating a material with a much reduced size, which is unfavorable for the utilization of the products of the follow-up processes. Analysis shows importance needs to be placed on the right way of using the image identification method and the selection of the material to be separated. An overall maceral separation idea of making stepwise liberation and stepwise enrichment is proposed. While ensuring the separation efficiency, the use of the proposed method can lead to reduction of operating cost and help promote the development of the organic macerals separation and enrichment undertakings.

Keywords: separation of coal; organic coal macerals; physiochemical properties; coking; liquefaction; liberation; image identification; flotation

传统的煤炭分选，主要集中在煤与矸石的分离上。煤炭经分选后，可有效节约运力，提高后续如燃烧、炼焦、气化、液化等用煤行业的利用效率及利用效果，并大大降低各用煤行业的污染物排放量。因此，选煤是洁净煤技术的源头，是煤炭得以清洁高效利用的重要保证。相应地，国家在多个场合、多个政策文件中提到、提出相关意见或政策，例如：《关于促进煤炭安全绿色开发和清洁高效利用的意见》中提到：“大力发展煤炭洗选加工，所有大中型煤矿均应配套建设选煤厂或中心选煤厂，开展井下选煤厂建设和运营示范，提高原煤入选比重”；将煤炭清洁高效利用相关制度写入《煤炭法》修订草案；《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中明确指出：“大力推动煤炭清洁高效利用”；等等。由此也可看出选煤作为煤炭清洁利用源头技术的重要程度。

自 1955 年新中国第一座选煤厂——鹤岗南山选煤厂建成、投产至今，选煤行业已经过 70 余年的发展，先后开发了重力分选、离心分选、流膜分选、泡沫浮选等多种选煤技术，以及跳汰机、浅槽重介分选机、重介质旋流器、智能光电分选机、风选机、机械搅拌式浮选机、喷射式浮选机等多种分选装备；同时，拓展至除传统炼焦煤分选的动力煤分选、喷吹煤分选、化工用煤分选、超低灰煤分选等多个应用领域。目前传统选煤的技术已十分成熟，甚至面临创新乏力的困境。

但实际上，煤炭除可分为煤炭自身与矸石外，从煤岩学的角度，煤炭自身也可分为多种煤岩有机显微组分，且组分间性质、应用性能等也存在较大

差异。为进一步促进煤炭行业的发展，找寻煤炭行业新的技术及经济增长点，有必要进行煤炭自身组分间分离、富集的相关研究。而在进行相关研究之前，首先应明确这些组分的概念、性质，组分间应用性能的差异及分离、富集的意义，以及当前相关研究的现状，等等，以作为进一步研究的基础，为后续研究提供方向。

1 显微组分的概念及基本性质

1.1 显微组分的分类及概念

煤岩显微组分是利用显微镜来观察煤片的微观研究方法，根据形态、轮廓、颜色、结构等，对煤的组成成分进行的划分。煤岩有机显微组分一般分为镜质组、壳质组和惰质组三大类。现有研究表明，显微煤岩与宏观煤岩（用肉眼观测对煤组成的划分）的关系非常密切，如图 1 所示：镜煤全部由镜质组构成，丝炭全部由惰质组构成，而亮煤和暗煤则是由三个显微组分以不同的比例组合而成^[1]。因此，针对煤岩显微组分分离、富集的相关研究，实际上已涵盖了宏观煤岩组分的相关研究内容。

对于各类煤岩有机显微组分，其成因、概念简要描述如下。

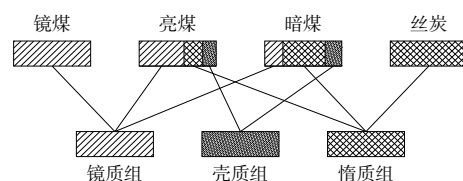


图 1 显微与宏观煤岩组成间关系^[1]

Fig. 1 Relationship between maceral and macrolithotype compositions^[1]

镜质组，煤中最主要的显微组分，在我国晚古生代煤中，含量一般在55%~80%^[2]之间，由植物的木质纤维组织经凝胶化作用形成，一般发生在弱氧化至还原环境中。显微镜下表现：透射光下的颜色由橙色到红色，随煤化程度的增高逐渐加深；透明度随煤化程度的增高而减弱，由透明到半透明；质地均匀，有明显的垂直裂纹；普通反射光下，呈灰色，在油浸反射光下呈深灰色、无突起^[3]。

惰质组，煤中较常见的显微组分，由植物的木质纤维组织经丝炭化作用形成，多发生在氧化环境中。显微镜下表现：透射光下，呈黑色，不透明；普通反射光下呈白色、突起高；油浸反射光下，呈白色到亮黄色。

壳质组，煤中含量一般不高，由植物有机组

分中化学性质稳定的角质层、孢子粉、树脂、树蜡等形成，成煤过程中几乎没有发生质的变化，原始形态特征保存完好。显微镜下表现：透射光下，呈黄色至棕黄色，透明到半透明，轮廓清楚，容易识别；普通反射光下，呈深灰色、稍有突起；油浸反射光下呈灰黑色至黑灰色^[3]。

相应的典型镜下特征示例，如图2所示。

因成因不同，除上述在显微镜下表现的颜色差异外，煤岩有机显微组分的元素组成、分子结构等也存在较大差异，而主要由成因、分子结构等决定的硬度、脆度、密度、表面电性、润湿性等物化性质也相应表现出了一定的差异，进而影响各组分在特定工艺用途中的性能，以及后续分离、富集方法的选择及最终的效果。

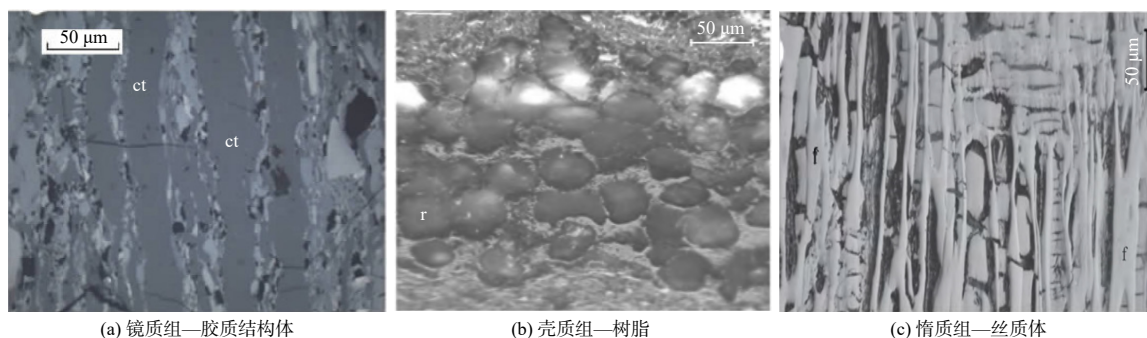


图2 煤岩有机显微组分的典型扫描电镜图像^[4-6]

Fig. 2 Typical scanning electron photomicrograph (SEM) of organic coal macerals^[4-6]

1.2 基本性质及其差异

1.2.1 元素组成及分子结构

煤中有机质的主要组成元素为C, H, O, N,

S, 5种元素合计占比可达98%以上，但不同煤岩组分间的元素组成仍存在一定差异，较典型的数据见表1。

表1 典型煤岩有机显微组分的分析数据^[7]

Table 1 Analysis data of typical coal macerals^[7]

%

序号	显微组(成)分	煤化程度(煤种)	产地	挥发分	元素含量		元素含量比(C/H)
					C	H	
1	镜质组			37.31	84.91	5.88	14.4
2	壳质组(树皮体)	气煤	乐平钟家山	49.47	87.27	7.03	12.4
3	惰质组(丝质体)			21.47	88.63	4.43	20.0
4	镜质组	肥煤	峰峰三矿	32.69	88.04	5.52	16.0
5	镜质组	焦煤	峰峰五矿	21.91	89.26	4.92	18.1
6	镜质组	瘦煤	峰峰四矿	17.88	90.73	4.82	18.8

目前，不同煤岩组分间元素组成的差异性已基本形成共识，即如表1中体现的：同一煤化程度的煤，惰质组碳含量最高、壳质组次之、镜质组最低，壳质组氢含量最高、镜质组次之、惰质组最低；不同煤化度的煤，随煤化程度的增高，各显微组分(镜质组、惰质组、壳质组)的碳含量增加，氢含量减少，各显微组分元素组成的差异逐渐缩小^[1-2]。

对于有机显微组分的分子结构，广大学者也进行了大量研究。王强等^[8]基于利用元素分析、FTIR、¹³C NMR等表征手段和分子模拟方法，对宁夏庆华煤的镜质组和惰质组进行了分子构建，结果为镜质组结构单元中芳碳、脂肪碳分别为173个和96个，而惰质组的两类碳数分别为195个和60个，建立的分子三维结构模型如图3所示。舒新前等^[9]

利用 FTIR 及有机溶剂抽提研究了神府煤的煤岩组分结构特征, 发现丝炭的芳香度大、缩合环数多、环缩合程度高、芳香氢所占比例多, 镜煤则反之; 同时, 镜煤中含有较多的烷基侧链及阳离子型基团, 而丝炭则含有较多的芳香基团及含氧官能团; 镜煤易抽提, 而丝炭则反之。

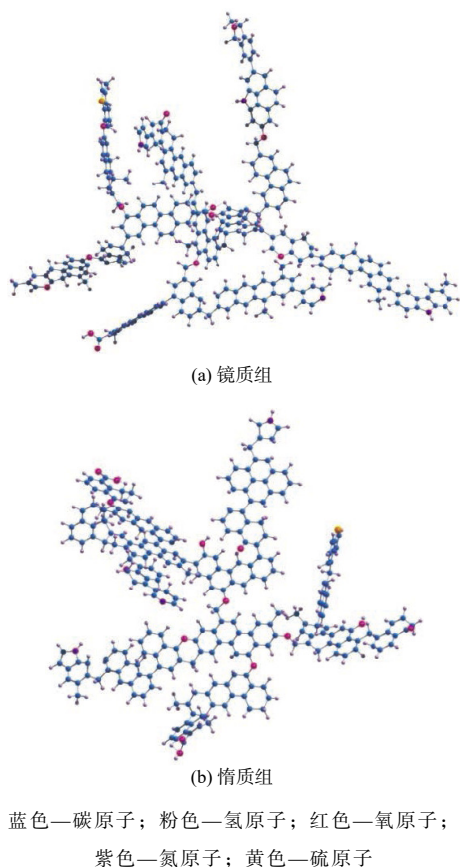


图 3 宁夏庆华煤镜质组和惰质组的分子三维结构模型^[8]
Fig. 3 Three-dimensional structural model of vitrinite and inertinite of Qinghua coal from the Ningxia Hui Autonomous Region^[8]

总体上, 对同一变质程度或同种煤而言, 壳质组芳香度最低, 有更多的脂肪环或脂肪链结构^[10]; 惰质组芳香度最高^[11], 镜质组介于二者之间; 而对于不同煤化程度的煤, 各显微组分的分子结构单元均随煤化程度的提高而缩合度提高、侧链量减少, 各组分间差异逐渐减小。

1.2.2 物理性质

(1) 密度。对于同一种煤或同一变质程度的煤, 一般壳质组的密度最低, 镜质组次之, 惰质组密度最高。例如, 韩永霞等^[12]发现望峰岗和徐州原煤壳质组、镜质组、丝质组分别主要集中在 < 1.25 , $1.25 \sim 1.35$, $1.35 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 密度级。而对于不同变质程度的煤, 各组分之间的密度差异随变质程度

的提高逐渐缩小。

(2) 反射率的差异宏观上表现为一定光照下的光泽强弱。一般而言, 惰质组最大 ($1.08\% \sim 5.0\%$), 镜质组次之 ($0.2\% \sim 2.0\%$), 壳质组最小 ($0.03\% \sim 1.0\%$); 且随煤化程度的提高, 各组分反射率差异逐渐缩小, 至有机组分中 C 含量超过 95% 时, 反射率基本趋于一致^[13]。

(3) 硬度和脆度可用 *HGI* (哈式可磨性指数) 表征^[14], 但不同变质程度煤中各显微组分的 *HGI* 的变化趋势稍有不同: HOWER 等^[15]对东肯塔基高挥发分烟煤的 *HGI* 进行研究, 指出提高煤中镜质组的含量对煤的可磨性有促进作用, 壳质组含量的增加将显著降低 *HGI* 值; 蔡昌凤^[16]研究指出神府长焰煤各宏观煤岩成分 *HGI* 值由大到小依次为: 丝炭 (文中未描述)、暗煤 (*HGI* 值 58)、亮煤 (*HGI* 值 54)、镜煤 (*HGI* 值 53); 王美丽等^[17]也发现对于低阶烟煤, 惰质组的可磨性比镜质组要好。

(4) 表面电性的大小和极性可分别用电动电位和零电点 (*ZPC*) 表征。一般情况下, 显微煤岩组分均呈负电性, 但惰质组电位更低^[18]; 电性的差异随煤化程度的提高而减小^[19]; 各显微组分的电性可通过调整矿浆 pH 值、添加阳离子调整剂等方式加以调控。例如: 舒新前等^[20]发现柠条塔的镜煤和丝炭的 *ZPC* 分别为 3.35 和 2.08, 大柳塔镜煤和丝炭的 *ZPC* 分别为 3.32 和 2.10; 两零电点之间, 镜煤表面呈正电性, 而丝炭表面呈负电性; 李华静等^[21]以神府煤为对象, 发现当 pH 值为 2.45 时, CTAB (十六烷基三甲基溴化铵) 溶液浓度为 $100 \sim 160 \text{ mg/L}$ 之间时, 镜煤与丝炭 Zeta 电位差值可达 68.76 mV。

(5) 介电常数可一定程度上反映矿物的导电性以及矿物间摩擦后带电的极性。褚建萍^[22]发现镜煤、亮煤及富含壳质组的暗煤往往介电常数较小, 而富含惰质组暗煤和丝炭的介电常数则较大, 且不同煤化程度煤的规律一致。孙振华^[23]以神东补连塔选煤厂原煤为研究对象发现, 相同荷电条件下, 镜质组荷正电, 而惰质组荷负电。

(6) 孔隙结构及比表面积, 与吸附性能、化学反应性能直接相关。喻天成^[24]研究发现中低阶煤的惰质组具有更大的孔体积和比表面积, 吸附能力也强于镜质组; 随煤化程度提高, 惰质组结构变化不大, 但镜质组生成许多新的超微孔 (孔径 $< 2 \text{ nm}$), 导致吸附能力强于惰质组。王月红等^[25]发现, 开滦煤中惰质组含量较高, 其主要以过渡孔

和微孔为主,占煤总孔隙体积数的90%以上,对煤样吸附CO起主导作用。

1.2.3 物理化学性质

煤岩组分分离、富集的相关研究中,最重要的煤岩组分物化性质即是表面疏水性。ARNOLD等^[26]发现疏水性的排序为:壳质组>镜质组>惰质组。陈跃等^[27]以黄陇煤田大佛寺煤矿4[#]煤为研究对象,也发现镜煤的接触角大于暗煤(天然接触角分别为66.9°和61.2°)。舒新前等^[28-29]发现镜质组中—OH较多,惰质组中—O—的浓度明显高于镜质组,且RCOO—略多于镜质组;且尽管镜质组中总氧含量较高,但是其极性氧官能团的数量较少,总体表现为疏水性,而惰质组尽管总氧含量较低,但其含氧官能团的数量较高,总体表现为亲水性。

2 工艺性能的差异及分离、富集的意义

物理、化学等基本性质的差异决定了各显微组分在不同用途中性能的差异,进而其决定了分离、富集的意义。

2.1 焦化

2.1.1 有机显微组分焦化性能差异

煤炭最关键的焦化性质即是黏结性,其表示在隔绝空气加热时黏结其本身及外来惰性物质的能力^[30]。现有研究表明,决定黏结性的关键因素为煤的元素组成及分子结构^[31]。例如:煤的有机显微组分中,镜质组缩合度居中,在加热过程中可软化、熔融,产生较多的胶质体,黏结性强;壳质组缩合度最低、氢含量最高,加热时虽也可软化、熔融,但产生的热解气体相对偏多,故黏结性弱于镜质组;而惰质组缩合度很高,加热时分子难以裂解、产生胶质体,因此基本无黏结性^[32]。上述可归纳为,同种煤的有机显微组分黏结性排序为镜质组>壳质组>惰质组。而对于不同的变质程度,则是随煤化程度的增高,镜质组黏结性逐渐增强,到烟煤阶段达到最大值,之后黏结性不断减弱,至无烟煤时已不具备黏结性^[33];壳质组因在煤中含量较低,故研究较少;而惰质组的黏结性则变化不大。

2.1.2 分离、富集对焦化的意义

在各变质程度的煤种中,中等变质程度的烟煤的镜质组黏结性最强,也因此仅气、肥、焦、瘦是我国炼焦用主要煤种^[34]。但是,我国虽煤炭资源储量丰富,赋存却极不均衡,尤其是肥煤、焦煤、1/3焦煤和瘦煤的资源储量仅占探获资源量的9.42%左右^[35],属我国稀缺煤种。

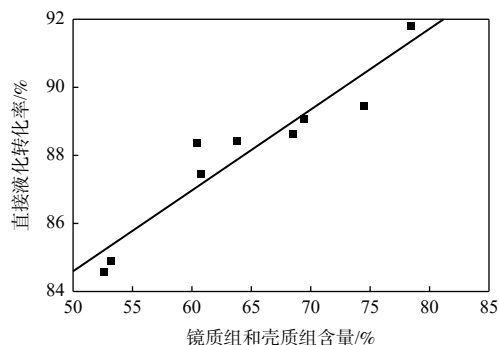
因此,为减少稀缺资源的消耗、扩大炼焦煤资源,广大学者从储量丰富的低阶烟煤(占全国探明储量的52%^[35])入手,进行了大量的配煤炼焦试验。但目前的研究结果显示,因低阶烟煤本身的黏结性较低、甚至不具黏结性,即使少量掺入也对焦炭的强度等关键性质影响较大。例如:徐君等^[36]发现配入低阶煤后,焦炭的冷态强度及热态性能变差,配比不应>5%;刘皓^[37]采用40 kg焦炉捣固炼焦,发现随着低变质的大保当不黏煤或长焰煤精煤的配入量的增加,焦炭的各项性能均在降低,配入量不应大于12%。而由显微组分间黏结性的差异来看,如将低阶烟煤中相对强黏结的镜质组加以分离、富集,则可能大幅提高本不具备黏结性或黏结性弱的煤类的配煤掺入量。如李宇航^[38]以神木地区的低变质程度煤为试验对象,发现灰分为7.25%的弱黏煤精煤的黏结指数为0,而从其中分离出的镜质组的黏结指数则为43.3,虽尚不及气煤(灰分9.1%、黏结指数70.1),但此镜质组的掺入量达到8%才对整体炼焦煤的黏结指数有较大影响。

目前,低阶烟煤的镜质组分分离、富集后做配煤炼焦的相关研究较少,但从已有研究结果来看,如能将之有效分离、富集,作为炼焦配煤原料,将大大扩展炼焦煤原料的来源、有效降低对国外资源的依赖,进一步对国家战略安全起到支撑作用。需要注意的是,炼焦工业中除对物料的黏结性有要求外,对物料的粒度也有一定要求^[39],因而对后续显微组分分离及富集的方法选择也有一定的限制。

2.2 液化

2.2.1 液化性能差异

煤炭液化是将煤炭通过一系列复杂的化学反应转化为液体燃料或化工原料的过程,根据技术路线的差异,可分为直接液化和间接液化两大类^[40]。两种技术路线中,间接液化先进行的是气化反应,而后对气化得到的气体产物进行缩合,对煤质的要求较为宽松;而直接液化则是直接将煤的分子进行裂解、加氢,因而对煤质的要求也更为严格。例如,对于煤岩显微组分的要求:1级直接液化用煤的惰质组含量要求≤15%,2级则要求≤45%^[41]。这主要是因为,壳质组和镜质组属活性组分,较易液化;而惰质组属惰性组分,很难液化^[42]。有研究表明,神东煤镜质组和壳质组的转化速率近惰质组的2.6倍^[43](如图4);而且煤中镜质组含量的提高,有望使油收率由目前的50%左右提高到70%左右^[44]。

图 4 镜质组和壳质组含量与液化转化率的关系^[43]Fig. 4 Contents of vitrinite and exinite vs conversion rate^[43]

煤岩有机显微组分间直接液化性能差异的原因可能归结于其分子结构与元素组成上: 壳质组和镜质组的分子结构缩合度较低, 更易裂解^[40], 且二者的 H/C 原子比更高, 反应时耗氢量也更低^[45]; 而惰质组分子结构的缩合度很高, 分子中键能也分布较为均衡, 难以直接裂解。但显微组分间液化机理上的差异, 目前的研究尚不充分。

2.2.2 分离、富集对液化的意义

据统计, 我国 2021 年石油消费量为 7.22 亿 t, 进口量为 5.13 亿 t, 出口量为 261 万 t; 2022 年消费量为 6.59 亿 t, 进口量为 5.08 亿 t, 出口量为 0.02 万 t (数据来源自国家统计局)。我国是当前世界最大的石油进口国, 进口依存度长期高达 70% 以上。因此, 立足于我国能源资源的赋存禀赋, 煤炭液化是保证能源安全不可或缺的重要举措。

对于煤岩显微组分, 其液化性能的差异主要体现在直接液化上, 而对间接液化并无明显差别。但是, 直接液化的吨油品综合煤耗约 1.5 ~ 2 t, 明显低于间接液化的 2.5 ~ 4 t^[46-47], 具有显著优势。因此, 有必要发展直接液化, 并与间接液化作为互相补充。

我国低变质程度煤因蕴藏丰富, 一直是煤制油的主要煤种, 但其中惰质组的质量分数普遍偏高 (> 35%), 导致其在直接液化过程中表现出能量转化效率和碳转化效率低等不足^[43-44]。因此, 进行煤岩组分的有效分离、富集无疑将对煤的直接液化以及整体液化行业起到促进作用。

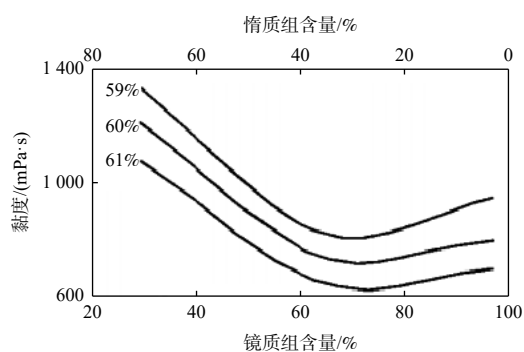
2.3 其他

其他工艺应用相较炼焦和液化而言, 用量相对偏小, 因此此处做统一描述。

2.3.1 其他工艺应用上的性能差异

水煤浆是由煤、水和少量添加剂经物理加工制成的具有一定细度、能流动的稳定浆体, 主要用作燃料和气化, 关键指标为成浆浓度和成浆稳定性。

尉迟唯等^[48]发现, 对于烟煤, 较高的镜质组含量、较低的惰质组含量有利于水煤浆的成浆和稳定, 且当惰质组含量低于 30% 时, 水煤浆软沉淀的时间一般都在 15 d 以上。祁威等^[49]发现, 随镜质组含量增加至 70% 左右、惰质组含量减少至 30% 左右, 可获得较高的浓度和较低黏度的水煤浆, 试验结果如图 5 所示。对此, 周德悟等^[50]经试验分析后认为丝质组孔隙多、比表面积大, 且亲水性强, 因而表面吸附的水量多, 导致能参与流动的水量少, 故其成浆性弱, 不易制得高浓度的水煤浆; 而镜质组是凝胶化组分, 之间更易形成凝胶的网状结构而阻止煤粒沉降及硬沉淀的产生。

图 5 水煤浆黏度与煤岩组分含量的关系曲线^[49]Fig. 5 Viscosity of coal-water mixture vs content of macerals^[49]

热解时, 壳质组的煤气产率和焦油产率最高, 镜质组次之, 惰质组的煤气、焦油产率最低^[2]; 除反应速度^[51]和气、液产物产率的差异外, 即使同一种煤, 各显微组分干馏产物的性质也差异较大^[52-53]。因此, 在一定程度上可通过煤岩组分的富集来调节干馏产物的性质, 尤其是对于煤岩组分间性质差异较大的低变质程度煤。

对于燃烧, 王竹民等^[54]发现镜质组是高炉未燃煤粉的主要来源, 在配煤过程中应适当降低喷吹煤粉中镜质组含量, 提高喷吹煤粉中丝质组含量。张华等^[55]也发现煤样中镜质组含量越高或惰质组含量越低, 其着火温度和燃尽温度越高, 燃烧性能越差。但对于自燃, 广大学者的研究结果则存在一定分歧, 例如田鹏、谷红伟等^[56-57]发现惰质组低温吸氧的能力较强, 并放出热量, 更易导致煤的自燃; 而徐初阳等^[58]以平庄、兖州、抚顺等矿区的褐煤和气煤为研究对象, 认为在同一煤阶, 镜质组最易氧化, 自燃倾向也比惰质组强。

在制备碳素制品上, 邢宝林等^[59]发现不同煤岩显微组分所制活性炭的孔结构存在显著差异, 其中惰质组活性炭的比表面积最高且中孔率最高, 其次

为镜质组，壳质组最低，改变煤岩显微组分，可以一定程度地调控活性炭中1.5~3.2 nm范围内的孔隙数量。

2.3.2 分离、富集对其他工艺用途的意义

煤岩有机显微组分的分离、富集是煤炭分质精细利用的基础^[60]，如惰质组作碳素材料、煤粉、燃料；如活性组分（镜质组、壳质组）作活性炭、煤制气、水煤浆，等等。

考虑到上述各应用中煤岩组分分离、富集的意义，笔者认为选煤应在矿物杂质分离技术的基础上，进一步进行有机显微组分的细化分离，对提升整个行业对煤炭的利用效率，以及提升上下游企业的利润率意义重大。

3 显微组分分离、富集的研究现状

明确了显微组分分离、富集的意义后，现对其分离、富集的研究现状进行叙述。

3.1 分离（解离）

解离是将矿物中呈连生体状态的目标矿物与非目标矿物分离的过程^[61]，过程中必然伴随着矿物粒度的减小，相应的，解离方法主要为破碎和磨矿。

现有研究表明，自然情况下，煤岩有机显微组分大多呈胶结嵌布，要想实现充分解离，解离粒度往往很低。例如：门东坡^[62]以解离度85%为标准，低阶神东长焰煤、高阶开滦东欢坨气煤和钱家营肥煤的最佳解离粒度分别为0.125，0.074 mm和0.074 mm，对应的镜质组单体解离度分别为91.88%，91.42%和90.77%，惰质组单体解离度分别为86.77%，87.81%和61.78%；其中神东长焰煤试验结果如图6所示。而HONAKER等^[63]则认为若想使煤岩显微组分获得充分的解离，煤粒粒度必须小于10 μm。但随着粒度的降低，破碎、磨矿功耗将显著增大，煤的表面性质也将发生明显改变，不利于后续的富集和利用。因此，解离粒度应在考虑解离度的同时，结合采用的富集方法加以确定。

另外，因煤岩有机显微组分间硬度和脆度存在差别，在破碎过程中往往会出现基于粒度的偏析现象。而且，不同的破碎方式，偏析的程度也有所差别。例如：陈跃华等^[64]发现破碎后煤粉的粒径与镜质组的含量呈正相关，粒径越大，其镜质组含量越高，且通过自制的旋风分离器可有效富集煤粉中的镜质组；李孟乐^[65]则发现持续磨矿会产生过磨，使镜质组向细粒级中迁移；赵世永^[66]以神府煤为研究对象，发现圆盘粉碎、微波辅助球磨、冲击粉碎

和气流粉碎等四种方式中，气流粉碎的选择性更高。据此，笔者认为若仅以某一显微组分为富集对象，则可先对破、磨后物料进行分级，而后选择目标组分富集的粒级进行分选，从而有效降低破、磨量或分选量。

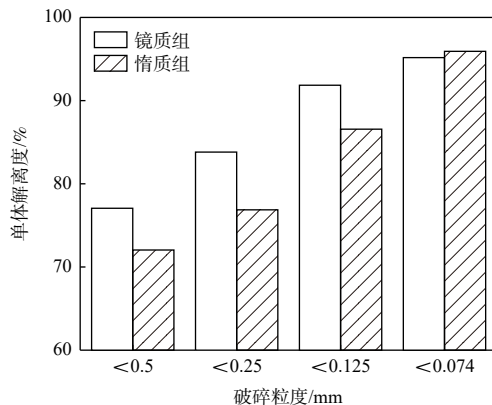


图6 神东长焰煤不同破碎粒度下显微组分的单体解离度^[62]
Fig. 6 Degrees of liberation of macerals from Shendong long-flame coal crushed to different sizes^[62]

3.2 富集（分选）

与选煤类似，煤岩有机显微组分的富集方法也主要包括手选、自动图像识别分选、重力分选以及浮选等。

3.2.1 手选及图像识别

手选是依据煤岩组分颜色、光泽、形态等的差异，通过肉眼识别对其进行分离的方法。此种方法，精度较高，但效率低、重现性差^[67]，难以大规模工业应用。

为弱化人工手选方法的缺点，参考手选原理的自动图像识别应运而生，该方法的关键在于图像的准确分割及识别，以及模型的自学习性。例如：王越等^[68]以反射率和形态参数为主，进行显微组分的自动识别，但制样缺陷、图像清晰度等易对识别结果有较大干扰；蒋敏^[69]首先通过霍夫变换、邻域均值替换等对煤岩显微灰度图像中划痕和假边界区域进行定位和修复，用以减少图像的误分割，而后通过自适应截断Gamma校正算法对煤岩显微灰度图像进行增强，减少由光照变化所产生的图像降质、失真和模糊等问题，最终模型识别结果与标准集较为相近；季菁菁等^[70]提出了一种基于迁移学习模型的煤岩显微组分图像识别算法，其对小数量的样本具有明显的优越性。

近年来，煤岩显微组分自动图像识别分选随着相机、图像识别技术、计算机处理技术的提升已取得了长足发展。但由于煤岩组分灰度参数、形态

参数的分布并无固定的规律性^[71], 而软件编制者对煤岩、煤质一般情况往往也较为片面^[72], 而且识别时还面临着连生体问题^[73], 等等。因此该方法目前仅停留在实验室研究阶段, 暂无工业相关试验。

3.2.2 重力分选

重力分选是依据密度差异进行的。广大学者对此也进行了大量的研究。

DORMANS 等^[74]采用浮沉试验方法进行了煤岩组分分离和富集; DYRKACZ 等^[75]在此基础上, 开发了等密度梯度离心分离煤岩组分的技术 (DGC); 刘朋^[76]应用此方法取得了一定的富集效果。以上的浮沉方法均使用氯化锌作为重液 (分选介质)。除此之外, 也有采用硝酸钙溶液^[77]和多钨酸钠水溶液^[78]作为重液的研究, 也取得了良好的效果。

但以重液浮沉为基础的富集技术, 最大的缺点是处理量很小, 且重液价格昂贵, 因而只限于实验室研究, 而不能工业化。为此, 蔡昌凤^[16]以微细介质小直径重介质旋流器分选柠条塔全级破碎煤 (粒度为 0.5 ~ 0.044 mm), 在选择较好的重介质旋流器结构和工艺参数情况下, 镜质组含量由原料中的 70.20% 提升至 80.70%, 取得了一定的效果。

除更换分选介质外, 广大学者也对各类重选设备的分选效果进行了大量探索。陶有俊、朱子祺等^[79-80]以神华低阶烟煤为研究对象, 利用 Falcon 离心分选机 (设备工作原理如图 7 所示) 进行镜质组富集, 平均富集比约 1.15, 取得了一定效果。

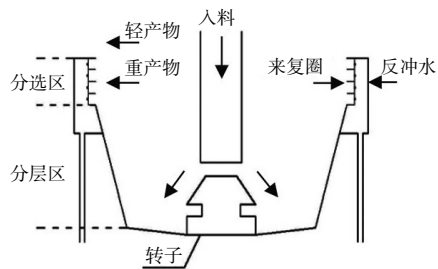


图 7 Falcon 离心分选机结构及工作原理示意图^[79]

Fig. 7 Sketch showing the structure and working principle of the Falcon centrifugal separator^[79]

TRAN 等^[81]在传统的基于干扰沉降原理的逆流分选机的中部流道内增加了倾斜板, 可起到稳定流态、缩小颗粒沉降距离的作用, 借此对澳大利亚某矿的 < 212 μm 粒级的烟煤进行分选, 可将镜质组体积含量由原矿的 52.4% 提高至超过 80%, 此时对应的分选密度为 1.27 g/cm³, 但产率未描述。相应分选系统如图 8 所示。

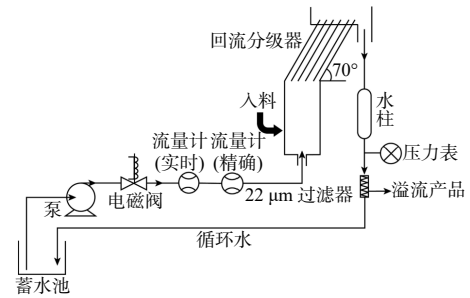


图 8 逆流分选机分选系统图^[59,81]

Fig. 8 Sketch of the counterflow separation system^[59,81]

实际上, 在基本性质的描述中已提到, 煤岩显微组分间的密度差异非常小, 仅在 0.1 g/cm³ 左右, 是不利于重选进行的, 因此常规的重力分选设备的效果也较为一般。结合现有重选理论^[82], 笔者认为提高重选精度应从以下几个方面入手: 窄粒度入选, 减少因形状、粒度对分离效果的影响; 进一步强化离心力场, 进而强化不同密度物间所受加速度的差异, 从而增加分离速度, 提高分选效果及处理能力; 尽可能降低分选介质的黏度及紊流度, 进一步减少粒度及形状的影响, 同时减少矿物间的混杂。

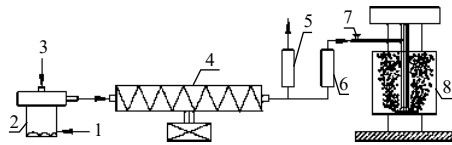
3.2.3 浮选

浮选是依据显微组分间表面疏水性的差异进行的, 但如基本性质中描述, 自然状态下的表面疏水性差异还不够大, 因而常规浮选方法效果一般较差, 需采用一些特殊的浮选方法或方式。

蒋莉^[83]以陕西红柳长焰煤洗精煤为试验对象, 在仅使用常规浮选药剂 (捕收剂为柴油、起泡剂为仲辛醇) 时, 浮选精煤的镜质组含量可由原煤的 57% 富集至 78%, 而在此基础上添加少量的阳离子表面活性剂 (十六烷基三甲基溴化铵) 后, 镜质组含量可提高至 89%, 且浮精产率也较高, 为 50.73%。龙江等^[84]采用油酸做捕收剂、聚乙二醇为起泡剂, 十六烷基三甲基溴化铵做表面活性剂, 也发现阳离子表面活性剂的作用很大。

赵世永等^[85]以神木王家沟煤为研究对象, 发现采用 HCl, NaOH 和 AlCl₃ 等不同调整剂时, 对应的适宜捕收剂类型、用量也有所差异; 且使用十二烷基三甲基溴化铵等离子型捕收剂, 试验条件下取得了较好的效果, 平均富集比可达 1.5, 产率也较高, 在 60% 左右。赵伟等^[86]也进行了类似试验, 并认为 AlCl₃ 可增大镜质组和惰质组表面润湿性差异, 尤其是当 AlCl₃ 用量介于两显微组分的零电点之间时。

安泉^[87]对屈进州^[88]设计的油泡发生装置进行改进后进行试验 (试验系统如图 9 所示), 发现油泡对疏水性差的惰质组的浮选效果有较大提升。



1—捕收剂；2—雾化器；3—空气；4—加热管；5,6—转子流量计；7—阀门；8—浮选机

图9 实验室油泡浮选试验系统^[87]

Fig. 9 Laboratory oil-bubble flotation experiment system^[87]

李孟乐^[65]在显微煤岩组分充分分解离的基础上，对比了常规浮选与荷电微纳米气泡浮选（试验系统如图10所示）的富集效果，发现常规浮选的最优结果为产率38.71%、镜质组含量69.94%，而基于煤岩显微组分表面电位调控，并使用荷负电微纳米气泡进行浮选时，产率可达49.58%，且镜质组含量也提高至74.31%，同时认为镜质组与惰质组表面性质相近导致可浮性差，因此常规浮选较难高效进行。

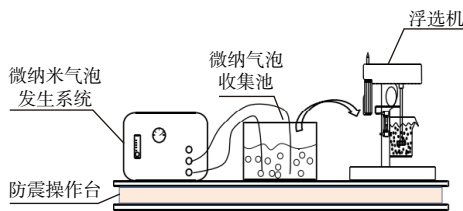


图10 荷电微纳米气泡浮选装置图^[65]

Fig. 10 Illustration of the charged micro nanometer air-bubble flotation apparatus^[65]

赵伟等^[89]自制了电浮选实验装置，发现电化学生凝聚作用可有效增强对惰质组分的浮选分离效果，试验范围内的最佳条件下惰质组富集率可达87.2%，沉物收率为21.1%。

也有研究认为，柱浮选比浮选机浮选更合适，因为其气泡尺寸更小且分选环境非常稳定^[90]。目前，浮选法是仅有的进行工业性试验^[91]的方法，且效果良好。但后续仍需进行进一步研究，以降低药剂消耗、简化药剂制度。

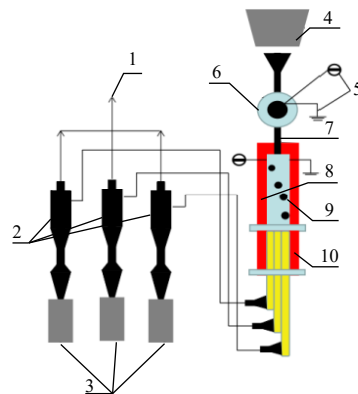
3.2.4 其他方法

王骏^[92]利用浮选-离心联合分选法，即首先进行浮选，而后对浮选的泡沫精矿进行离心重力分选，浮选采用实验室用小浮选机，离心重力分选以四氯化碳等有机液体作为重液、采用高速离心机进行，所得镜质组富集物中镜质组含量由37.25%提高到了79.56%，惰质组富集物中惰质组含量由45.76%提高到了72.25%。

化学法，主要是氧化法，即利用浓硝酸、过氧化氢等氧化剂使镜质组氧化，而其他显微组分具

有抗氧化性，从而保留下来，得到富集的显微组分^[93]。氧化法的条件相对苛刻，而且对煤的性质和结构影响较大，因此只能用于特定的煤种或用途，具有一定的局限性，限制了其应用。

褚建萍^[22]对神木长焰煤进行高压电选，取得了较好的富集效果，但对乐平煤效果较差。何鑫^[94]以神华地区低阶烟煤为对象，研究发现在摩擦电选过程中镜质组易带正电，在负极产品中富集；惰质组易带负电，在正极产品中富集；在采用二段分选时，与原煤相比，产品中镜质组和惰质组含量分别上升了13.99和12.88个百分点。XIAN等^[95]应用旋转摩擦电选对低阶煤显微组分进行分选（试验系统如图11所示），在系统给料速度为1.5 g/s，摩擦轮转速为3000 r/min，极板电压为20 kV等最佳试验条件下，得到了镜质组含量为72.03%的产品，此时回收率为67.86%，效果较好。国外学者INCULET^[96]采用自研的稀相摩擦带电的超细颗粒分选环状装置，用于煤岩组分的分离也取得了良好的效果。



1—真空源；2—旋风除尘器；3—产物收集罐；4—入料斗；5—高压直流电源；6—旋转摩擦轮；7—物料分布装置；8—高压直流电极板；9—分选区；10—分矿板

图11 旋转摩擦电选试验系统图^[95]

Fig. 11 Illustration of the rotary triboelectrical separation system^[95]

4 结语及展望

(1) 煤的有机显微组分包括镜质组、壳质组、惰质组三大类，各分类间元素组成及分子结构、密度、反射率、硬度和脆度、表面电性等性质也有所差异，而且这些性质的差异均会随煤变质程度的升高而减小。

(2) 不同组分间性质的差异决定了各类组分的利用性能的差异，进而决定了煤岩组分分离、富集的意义，尤其对于炼焦和液化，前者可大大扩展炼

焦用煤的来源、减少稀缺煤种的消耗,后者可大幅提高液化的转化率、进而促进对能源安全的保障。

(3) 对于煤岩组分分离、富集方法的研究较多,如光电分选、重选、浮选、电选等,其中重选和浮选相对而言更加成熟,但仍缺少工业性实践。

总体而言,在我国“双碳”战略以及煤炭清洁、绿色发展的背景下,煤炭资源高质量转化利用势在必行。而煤岩显微组分的分离、富集是煤炭分质、精细利用的基础,更是炼焦、液化等具有重大战略意义行业发展的基石。但是,目前煤岩显微组分分离、富集方法的研究,往往过于注重解离度,导致后续分选环节的人料粒度偏细、分选难度大、成本高,且会影响后续的产品利用(如焦化对粒度、表面性质等要求)。因此,笔者认为可借鉴智能光电选,采用对反射光(或其他光学性质)进行识别(类似手选)的原理先对已解离的大块进行分选,这种方式成本低,且对于特大型选煤厂而言,产量也很可观。同时,煤岩组分的分离、富集也可选择一些富矿或粒度适宜的原料,以简化流程、提高效率、降低成本。另外,也应重视多种解离与富集方法的总体设计,例如采用阶段解离、阶段富集(如粗解离后用重选出三产品,两端保证富集,中间密度物再去破碎、磨矿)的方式,在保证效果的同时减少破、磨量,减少浮选量,进而降低成本。

参考文献:

- [1] 郭崇涛. 煤化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [2] 张双全. 煤化学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2019.
- [3] 全国煤炭标准化技术委员会. 烟煤显微组分分类: GB/T 15588—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] 代世峰, 唐跃刚, 姜尧发, 等. 煤的显微组分定义与分类 (ICCP system 1994) 解析 I: 镜质体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1821—1832.
- [5] 代世峰, 赵蕾, 唐跃刚, 等. 煤的显微组分定义与分类 (ICCP system 1994) 解析 IV: 类脂体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2965—2983.
- [6] 代世峰, 王绍清, 唐跃刚, 等. 煤的显微组分定义与分类 (ICCP system 1994) 解析 II: 惰质体[J]. 煤炭学报, 2021, 46(7): 2212—2226.
- [7] 陶著. 煤化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
- [8] 王强, 毛宁, 杨妍, 等. 宁夏庆华煤镜质组和惰质组显微组分的分子结构及对比分析[J]. 化工进展, 2020, 39(S2): 142—151.
- [9] 舒新前, 王祖訥, 徐精求, 等. 神府煤煤岩组分的结构特征及其差异[J]. 燃料化学学报, 1996(5): 50—57.
- [10] VAYISOGLU E S, BARTLE K D, ERBATUR N G, et al.

Chemical composition of SCG extracts obtained from coal and maceral concentrates[J]. Fuel Processing Technology, 1996, 46(2): 99—115.

- [11] 孙庆雷, 李文, 陈皓佩, 等. 煤显微组分分子结构模型的量子化学研究[J]. 燃料化学学报, 2004(3): 282—286.
- [12] 韩永霞, 姚昭章. 煤岩显微组分富集物的特性研究[J]. 华东冶金学院学报, 2000(3): 209—212.
- [13] 解维伟. 煤化学与煤质分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [14] 李小江. 显微煤岩组分对哈氏可磨指数的影响规律[J]. 煤炭分析及利用, 1989(4): 7—14.
- [15] HOWER J C, GRAESE A M, KLAPHEKE J G. Influence of microlithotype composition on hardgrove grindability for selected eastern Kentucky coals[J]. International Journal of Coal Geology, 1987, 7(3): 227—244.
- [16] 蔡昌凤. 煤岩组分的解离特性与分离技术[J]. 洁净煤技术, 1998(3): 24—27.
- [17] 王美丽, 舒新前, 朱书全. 煤岩组分解离与分选的研究[J]. 选煤技术, 2004(4): 33—36.
- [18] 段旭琴, 王祖訥, 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(5): 630—635.
- [19] 李启辉, 吴国光, 孙志强, 等. 煤化程度与颗粒大小对煤表面 zeta 电位影响研究[J]. 能源技术与管理, 2007(3): 81—82.
- [20] 舒新前, 朱书全, 王祖訥, 等. 神府煤煤岩组分的表面电位研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1996(4): 333—338.
- [21] 李华静, 李远刚, 赵伟, 等. 神府煤煤岩组分表面电性调控研究[J]. 煤炭转化, 2012, 35(3): 15—18.
- [22] 褚建萍. 煤岩组分与高压电选关系的研究[J]. 选煤技术, 2003(5): 14—17.
- [23] 孙振华. 神东长焰煤煤岩显微组分电选富集研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [24] 喻天成. 不同煤岩显微组分组的孔隙结构及吸附性能研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [25] 王月红, 郭立稳, 张九零, 等. 开滦煤显微组分结构特征与吸附 CO 的关系[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 373—376.
- [26] ARNOLD B J, APLAN F F. The hydrophobicity of coal macerals[J]. Fuel, 1989, 68(5): 651—658.
- [27] 陈跃, 马东民, 夏玉成, 等. 低阶煤不同宏观煤岩组分润湿性及影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(9): 97—104.
- [28] 舒新前, 王祖訥, 葛岭梅. 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(1): 40—45.
- [29] 段旭琴, 王祖訥. 煤显微组分表面含氧官能团的 XPS 分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 498—501.
- [30] 苏宜春. 炼焦工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.

- [31] 李祥,秦志宏,卜良辉,等. 炼焦煤的官能团结构分析及其黏结性产生机理[J]. 燃料化学学报, 2016, 44(4): 385-393.
- [32] 赵悦,王杰平,季斌,等. 煤岩配煤技术研究进展[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(6): 22-25.
- [33] 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.
- [34] 程庆辉. 煤炭产运销质量检测验收与选煤技术标准实用手册[M]. 北京: 科海电子出版社, 2003.
- [35] 中国煤炭地质总局. 中国煤炭资源赋存规律与资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [36] 徐君,邵国庆,白金锋,等. 配入低阶煤炼焦对焦炭性能影响的研究[J]. 燃料与化工, 2013, 44(3): 1-4.
- [37] 刘皓. 低变质煤配入量对焦炭性能的影响研究[J]. 中州煤炭, 2016(3): 126-128.
- [38] 李宇航. 配低阶煤显微组分对炼焦煤塑性性质的研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2016.
- [39] 姚昭章. 炼焦学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
- [40] 舒歌平. 煤炭液化技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [41] 全国煤化工标准化技术委员会. 商品煤质量直接液化用煤: GB/T 23810—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [42] 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.
- [43] 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(4): 9-12.
- [44] DOMINIQUE B, AFIF A, GÉRALD D M, et al. Comparison by GC-MS of liquefaction extracts from coal maceral concentrates[J]. Fuel, 1995, 74(3): 407-415.
- [45] 周扬,张媛媛,陈丽诗,等. 两种西部煤的化学结构及加氢液化性能[J]. 煤炭转化, 2017, 40(6): 1-6.
- [46] 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, 2016.
- [47] 胡发亭,颜丙峰,王光耀,等. 我国煤制燃料油技术进展及工业化现状[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(1): 57-63.
- [48] 尉迟唯,李保庆,李文,等. 中国不同变质程度煤制备水煤浆的性质研究[J]. 燃料化学学报, 2005(2): 155-160.
- [49] 祁威,舒新前,王祖训,等. 神府煤制水煤浆的研究[J]. 煤炭科学技术, 2003(7): 34-35, 49.
- [50] 周德梧,万大春,杨勇. 煤的岩相显微组分与成浆性[J]. 煤化工, 1996(4): 35-38.
- [51] 闫顺风,冯松宝,张雅茹,等. 淮北煤田任楼煤矿煤的不同显微组分热解特征[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2019, 33(3): 39-42.
- [52] 赵伟,张晓欠,周安宁,等. 神府煤煤岩显微组分的浮选分离及富集物的低温热解产物特性研究[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(5): 527-533.
- [53] 孙庆雷,李文,陈皓侃,等. 神木煤显微组分热解和加氢热解的焦油组成[J]. 燃料化学学报, 2005(4): 412-415.
- [54] 王竹民,刘然,吕庆,等. 煤岩组分对高炉喷吹煤粉燃烧率的影响[J]. 钢铁研究学报, 2010, 22(5): 23-26.
- [55] 张华,张生富,况雨岑,等. 煤岩性质对煤粉燃烧行为的影响研究[C]//中国金属学会. 第十三届中国钢铁年会论文集—2. 炼铁与原燃料. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- [56] 田鹏,辛广顺. 煤岩显微组分对煤自燃的影响[J]. 能源与节能, 2012(11): 19-21.
- [57] 谷红伟. 煤岩组分的物化性质对煤自燃的影响[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(6): 59-61.
- [58] 徐初阳,聂容春,唐修义. 煤岩组分的氧化及自燃倾向性[J]. 煤炭科学技术, 1997(7): 45-48.
- [59] 邢宝林,郭晖,谌伦建,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.
- [60] 周安宁,张怀青,李振,等. 低阶烟煤煤岩显微组分分选及其分质利用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(7): 1-22.
- [61] 威尔斯 BA, 马恩 TJ 纳皮尔. 矿物加工技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [62] 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.
- [63] HONAKER R Q, MOHANTY M K, CRELLING J C. Coal maceral separation using column flotation[J]. Minerals Engineering, 1996, 9(4): 449-464.
- [64] 陈跃华,刘付升,刘新颖,等. 煤直接液化用煤煤岩组分分布特性及油收率研究[J]. 煤化工, 2023, 51(1): 39-41.
- [65] 李孟乐. 高惰质组煤煤岩显微组分分离特性与荷电微纳气泡浮选富集基础研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [66] 赵世永. 神府煤选择性破碎机理及其煤岩组分分离富集研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [67] NAG D, DUBEY G, DASH P S, et al. Coal macerals and their separation methodologies—A review[J]. Metallurgical Research and Technology, 2021, 118(3): 1-14.
- [68] 王越,白向飞,曲思建. 基于反射率及形态学参数的煤岩显微组分自动识别模式[J]. 煤质技术, 2021, 36(3): 14-20.
- [69] 蒋敏. 基于多特征的煤岩显微组分自适应分类和识别算法研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
- [70] 季菁菁,奚峥皓,李忠峰. 基于深度迁移学习的煤岩显微组分识别算法[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(2): 92-97.
- [71] 丁华,张宇宏,白向飞. 煤中有机显微组分自动识别初步研究[J]. 煤质技术, 2009(1): 1-5.
- [72] 白向飞. 煤岩自动测试技术路线及关键问题分析[J]. 煤质技术, 2011(2): 6-12.
- [73] 王越,丁华,武琳琳,等. 煤岩显微组分自动识别技术

- 现状及关键问题分析[J]. *煤质技术*, 2019, 34(1): 1 - 4.
- [74] DORMANS H, HUNTJENS F, KREVELEN D V. Chemical structure and properties of coal—composition of the individual macerals (vitrinites, fusinites, micrinites and exinites) [J]. *Fuel*, 1957, 36(3): 321 - 339.
- [75] DYRKACZ G R, RUSCIC L. An investigation into the process of centrifugal sink/float separation of micronized coals. 2. Multiple fractionation of single coal samples[J]. *Energy & Fuels*, 1992, 6(6): 743 - 752.
- [76] 刘 朋. 宁东矿区洗选精煤岩组分分离研究[J]. *煤炭工程*, 2019, 51(8): 160 - 164.
- [77] CLOKE M, BARRAZA J, MILES N J. Pilot-scale studies using a hydrocyclone and froth flotation for the production of beneficiated coal fractions for improved coal liquefaction[J]. *Fuel*, 1997, 76(13): 1217 - 1223.
- [78] GILFILLANA A, LESTERA E, CLOKEA M, et al. The structure and reactivity of density separated coal fractions[J]. *Fuel*, 1999, 78(14): 1639 - 1644.
- [79] 陶有俊, 赵友男, 姜宇帅, 等. 低阶烟煤煤岩组分分离特性及强化重力分选研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(1): 184 - 189.
- [80] 朱子祺. 复合力场中煤岩显微组分的高效富集[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(4): 1028 - 1033.
- [81] TRAN O, STANCER R, XIE W, et al. Maceral separation from coal by the Reflux Classifier[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 143: 43 - 50.
- [82] 谢广元. 选矿学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [83] 蒋 莉. 低阶煤显微煤岩组分的粉碎解离特性及浮选试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [84] 龙 江, 杨志远, 屈世存, 等. 浮选法分离富集新疆煤煤岩组分的实验研究[J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S2): 489 - 494.
- [85] 赵世永, 李 博, 吴 阳, 等. 煤岩组分浮选捕收剂的优选试验研究[J]. *选煤技术*, 2016(5): 9 - 14.
- [86] 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(S1): 185 - 190.
- [87] 安 泉. 神府煤煤岩显微组分表面性质与油泡浮选研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [88] 屈进州. 低阶煤活性油泡浮选行为与浮选工艺研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [89] 赵 伟, 李 振, 杨志远, 等. 煤岩显微组分的电浮选分离及其电化学凝聚特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(5): 1104 - 1112.
- [90] NAG K R S. Vitrinite Maceral Separation Using Column Flotation[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2018, 38(1): 13 - 29.
- [91] BARRAZA J, PIERES J. A pilot-scale flotation column to produce beneficiated coal fractions having high concentration of vitrinite maceral - ScienceDirect[J]. *Fuel*, 2005, 84(14): 1879 - 1883.
- [92] 王 骏. 延长煤显微组分浮选-离心分离及其催化解聚研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [93] 涂建琪, 金奎励. 煤成烃热模拟中的有机显微组分分离研究[J]. *石油实验地质*, 1997(3): 289 - 291.
- [94] 何 鑫. 低阶煤显微组分摩擦荷电机理及电选分离研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [95] XIAN Y, TAO Y, MA F, et al. Effects of rotary triboelectricity technology on macerals separation for low-rank coal[J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2022, 42(11): 3249 - 3263.
- [96] INCULET I I, BERGOUGNOU M A, BROWN J D. Electrostatic Separation of Particles Below 40 μm in a Dilute Phase Continuous Loop[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, IA-13(4): 370 - 373.