Clean Coal and Energy 清洁煤与能源, 2016, 4(4), 25-32
Published Online December 2016 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/cce
http://dx.doi.org/10.12677/cce.2016.44004

Hans汉斯

Present Situation and Analysis of Macerals Separation and Utilization Technologies

Xin He, Xinxi Zhang*

[1]School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
[2]Key Lab of Coal Processing and Efficient Utilization, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
Email: *zhangxinxi@126.com

Received: Nov. 17th, 2016; accepted: Dec. 4th, 2016; published: Dec. 7th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

Abstract

Along with serious environmental pollution caused by coal combustion as well as the scarcity of oil resource, high efficient and clean utilization of coal resource has becoming the immediate research focus. The useful organic matter in coal can be classified into three coal maceral types: exinite, vitrinite and inertinite. The separation and the further processing technologies such as pyrolysis, gasification and liquefaction of macerals according their different features could improve coal utilization rate effectively and lighten oil resource's shortage. In this paper, the research progress of macerals separation and utilization technique is introduced and the further development and improvement are analyzed.

Keywords

Macerals, Flotation, Triboelectrostatic Separation, Pyrolysis, Gasification, Liquefaction

煤岩有机显微组分分离与应用的现状与分析

何　鑫，章新喜*

[1]中国矿业大学，化工学院，江苏　徐州
[2]中国矿业大学，煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室，江苏　徐州
Email: *zhangxinxi@126.com

*通讯作者。

文章引用: 何鑫, 章新喜. 煤岩有机显微组分分离与应用的现状与分析[J]. 清洁煤与能源, 2016, 4(4): 25-32.
http://dx.doi.org/10.12677/cce.2016.44004

收稿日期：2016年11月17日；录用日期：2016年12月4日；发布日期：2016年12月7日

摘　要

随着石油资源的紧缺和煤炭加工带来的环境污染日趋严重，煤炭资源的清洁和高效利用成为当下的热点课题。煤岩有机显微组分可以将煤中有用的有机质主要分为三种：壳质组、镜质组和惰质组。分离煤中显微组分并根据显微组分不同的特性进行煤炭深加工如热解、气化和液化，可以有效提高煤炭利用率且缓解石油资源短缺的现状。本文对当前煤岩有机显微组分的分离和应用技术研究进展进行了介绍，分析了其发展方向和前景。

关键词

显微组分，浮选，摩擦电选，热解，气化，液化

1. 引言

煤炭资源是当今中国乃至世界的主要能源来源之一，对工业技术的发展和人类社会的进步起到了极大的促进作用。作为有机质和少数无机矿物质的混合物，早期煤炭加工技术主要着重于分离煤中的主要有机质碳和无机矿物质。然而，日趋严重的环境污染和对于清洁能源的迫切需求，使得煤炭加工产业更加注重洁净煤技术。近年来，关于分离应用煤中不同有机质的研究日渐增多。从煤岩学角度，可以将煤中的有机质分为三种基本有机显微组分：壳质组(又称稳定组或类脂组)、镜质组、惰质组。由于三种显微组分具有不同的物理结构和化学性质，在煤炭的深加工利用如燃烧、液化、气化、热解等过程具有不同甚至是截然相反的作用[1]，各种显微组分分离和应用技术纷纷兴起，本文主要对当前的煤岩有机显微组分分离及应用技术进行介绍和展望。

2. 显微组分的分离

2.1. 显微组分湿法分选技术

2.1.1. 沉浮分离法和 DCG 梯度离心法

沉浮分离法和 DCG(梯度离心法)是最早出现的分离煤中显微组分的方法。两者都是基于三种显微组分不同的密度进行分离。沉浮分离法是将煤破碎成粒度低于大约 68 μm 的细颗粒，让煤中的有机显微组分得到一定的解离。将细颗粒煤置于含有有机重介质或无机盐溶液中进行离心分离，选取各显微组分对应的密度范围溶液过滤清洗得到最终分离后的有机显微组分。

DCG 最早是由 G. R. Dyrkacz 等人[2]于 1981 年提出，并于后续几年进行了改进。DCG 和沉浮分离法类似，都是基于显微组分的密度差异且利用离心机进行分离。DCG 基于几个方面做出了改进，首先将煤样磨至 200 μm 以下并进行去矿物质处理，降低矿物质对显微组分分离过程的影响。为了使显微组分充分解离，将煤样再破碎至 40 μm 以下，采用 CsCl 水溶液做梯度离心液，使用分散剂并用轻微的超声波处理使煤样充分分散在低密度溶液后再加入梯度离心液进行离心分离。DCG 去除了矿物质的干扰并充分解离了煤样，得到的显微组分纯度更高。但是由于 DCG 需要样品在离心液中达到完全分散的状态，使其处理量十分有限。G. Dyrkacz 等人在此基础上又于 1982 年提出了改进方法，为提高产率对破碎后的煤样进行了预分离，确定一定的密度梯度区间后再次分离，但 DCG 的处理量最高也只是提升至 15~20 g 左右。

相对于沉浮分离法，DCG 法分选得到的显微组分的纯度较高，可以进行更小区间内的密度分离。然而，在实际应用中，浮沉离心法由于其简单的原理及步骤，应用相对较多。总结这两种分选方法，由于分选过程中均应用了化学药剂处理，可能改变显微组分的表面性质进而影响后续的加工过程，因此，浮沉分离法和 DCG 目前只适用于实验室范围内研究。

2.1.2. 浮选法

分离显微组分必须首先让显微组分进行充分解离，要求至少要将煤样破碎至 74 μm 以下。浮选法是广泛运用的细颗粒煤样的分选方法。1988 年 Arnold 和 Aplan [3]对三种显微组分的接触角进行测量，壳质组、镜质组和惰质组的接触角分别为 90˚~130˚、60˚~70˚和 25˚~40˚，判断得出壳质组和镜质组的疏水性较好，而惰质组的疏水性较差。且由于三者的密度差异，壳质组和镜质组较轻，惰质组较重。浮选过程中，壳质组和镜质组更易随着气泡上升成为溢流，惰质组则沉在底部称为底流，达到分离的目的。1995 年 R. Q. Honaker 等人[4]采用了浮选柱分离煤中的显微组分，随着 PH 值从 8 到 11，浮选速率不断降低。在适宜的实验条件下，惰质组的富集率可以提升约 40%，而壳质组和镜质组只能提高 5%~10%。舒新前等人[5]在 2002 年对神府煤进行了浮选法分离，当将精煤产率控制在 69%以下时，精煤中的镜质组的含量会有一定程度的提高，可以达到 80%左右。2005 年 Juan 等人[6]对浮选柱分离显微组分进行了半工业规模试验，采用了两种烟煤做原样进行试验，分别将两种煤样的镜质组含量提高了 14%和 4%左右。E. Jorjani 等人[7]于 2013 年研究浮选颗粒粒度对试验结果的影响，将入选颗粒分为<25、25~40、40~75、75~150 以及 150~500 μm 五个粒度级进行分选。分析显示，所有入选煤样中，镜质组都主要集中在 40~75 和<25 μm 两个粒度级中，镜质组的含量随着粒度级的升高而降低。与镜质组相反，壳质组的含量随着粒度级的升高而升高。

浮选法不仅充分利用了煤炭显微组分疏水性差异，简化了分选步骤，操作简单，处理量也较高。但是，浮选法同样需要添加化学药剂，对于显微组分的表面性质和后续处理还是会造成一定影响。除此之外，浮选法往往只能对样品中的某一种显微组分的富集率提升具有显著影响，分选效率虽有所提升但分选范围十分有限。

2.1.3. 回流分级法

回流分级法为近几年刚刚涌现的新技术。Wei Xie 等人[8]和 Quang Anh Tran 等人[9]分别于 2013 年和 2016 年采用了回流分级法分离了显微组分，后者详细介绍了回流分级器的作用原理。回流分级法只采用水作为分选介质，分选原理基于水流速度和颗粒的沉降速度。通过泵将水打入流化层，调节水流速度，使得入料在上升水流以及颗粒自身的重力作用下在分级器的倾斜板上分离，轻颗粒随水流上升溢出过滤，滤液返回系统中作为循环水，重颗粒则返回到流化层部分进行再次分选。水流速度由电磁阀进行调节，通过变化不同的水流速度，可以得到含有不同密度颗粒的上层清液。在适宜的试验条件下，镜质组可以提高 15%的富集率。

以水作为唯一分选介质的回流分级法，避免了化学处理带来的后续深加工影响，提高了处理量，同时也取得了较好的分离效果。只是分选过程中需要大量的水资源以及后续的脱水干燥流程，加大了生产成本。

2.2. 显微组分干法分选技术

湿法分选不仅存在耗水量大、干燥产品成本较高等问题，完全解离状态下的超细显微组分颗粒的过滤也是难以解决的关卡。电选作为干法分选不仅降低了水资源成本并且避免了细颗粒过滤干燥的难题。电选分离显微组分主要基于不同组分的表面性质差异，从根本上是基于组分的表面功函数差异，得失电

子能力不同导致呈现的表面电性不同，从而在电场中分离。

早在 1982 年，Inculet 等人[10]研究了不同显微组分表面接受电荷的能力，发现不同的组分具有不同的带电极性。镜质组大多呈现带正电的情况，而惰质组表面更易显负性。惰质组更易带负电的主要原因是因为惰质组具有疏松的孔隙结构，填充了一部分在磨矿过程未能解离的矿物质，受矿物质极易带负电的影响而呈现带负电。1987 年，G. R. Dyrkacz 和 P. Aznavoorian 等人就提出采用电磁选分离煤岩显微组分。G. Zhou 和 J. D. Brown 等人[11]于 1988 年采用电选分离煤中的显微组分，为加大煤岩显微组分表面功函数的差异，分别采用了芳香性和脂肪性化学药剂进行表面处理，分选结果显示芳香性药剂对显微组分的分离效果好，产品中的镜质组达到了一定的富集。1997 年，C. James 等人[12]选用了四种烟煤进行摩擦电选分选研究，分析选后煤样的煤岩类型种类和含量测定。四种煤样均表现出不同程度的显微组分富集现象，同时，负极收集的产品中镜质组的含量增加而正极收集的产品中惰质组的含量增加。

显微组分作为一种微观组分，其表面电性质的分析与研究具有一定难度，且摩擦电选技术并未真正大规模运用于煤的商业加工中，因而近十年间并未出现关于显微组分电选研究成果。目前应用摩擦电选分选煤的研究依然主要集中于分离煤中含碳有机质和矿物质方面，分离显微组分作为新的分选趋势并未引起关注。但是摩擦电选作为仅采用空气作为载体，对于超细颗粒作用显著的一种干法分选技术，十分适用于煤中显微组分的分离。未来探索显微组分的表面电性质差异以及其应用摩擦电选的分离效果，对煤炭资源深加工以及洁净煤技术都具有十分重要的意义。

3. 显微组分的应用

3.1. 显微组分的气化

煤的气化是在气化剂作用下把煤及其干馏产物最大限度地转化为煤气的过程。从煤的有机组成角度考虑，分析煤中的三种有机显微组分在气化过程中的反应对于提高气化效率有着十分重要的意义。

近年来显微组分的气化反应方面的研究并不多，谢克昌等人[13]于 1994 年采用差热分析技术研究了平朔烟煤三种显微组分分别在水蒸气和 CO_2 下的加压气化反应性能。显微组分的反应速率均随着压力的增加而上升，在水蒸气条件下，三者的反应速率为惰质组 > 镜质组 > 壳质组，而 CO_2 条件下的结果则正好相反：壳质组 > 镜质组 > 惰质组。2002 年，孙庆雷等人[14]对神华煤镜质组和惰质组半焦的气化特性进行了研究。两者的气化反应性均随着温度和压力的升高而增加。同种条件下，镜质组半焦有着更好的气化反应性。Ke-chang Xie 等人[15]于 2005 年对平朔煤三种显微组分在 CO_2 条件下气化生成 HCN 和 NH_3 的特性进行了研究。NH_3 主要来自在于气化过程中含 H 基团的形成，惰质组和镜质组、壳质组相比，能转换更多的 N 原子形成 NH_3。2009 年，丁华等人[16]采用了非等温热重法(DTG)分析了神华煤及显微组分焦在水蒸气下的气化反应性。在相同的反应条件下，无论升温速率和气压怎么变化，三者的反应性顺序均为：镜质组焦 > 原煤焦 > 惰质组焦。J. H. Wang 等人[17]于 2015 年选用了几种具有不同还原性的煤及其显微组分进行等温 CO_2 气化反应研究。分析显示高还原性煤具有低气化程度，而随着保温时间和最终温度的上升，镜质组相对于原煤、惰质组表现出了低气化性。

煤气化技术作为一种煤炭清洁使用技术应用的时间较长，但是在气化效率以及气体产率等方面依然存在很大的提升空间。从近年来的气化研究来看，影响煤中显微组分气化的因素众多，煤阶、煤种、气化压力以及温度、升温速率都能显著影响显微组分的气化特性。不同煤种间显微组分的气化性不甚相同甚至完全相反，目前煤气化技术仍然存在以下四个方面的问题需要改进。1) 不同煤种的气化反应性差别。2) 显微组分表面结构、性质与气化反应性之间的联系。3) 气化反应过程中操作条件对于显微组分气化性能的影响。4) 显微组分在气化过程中的协同作用。

3.2. 显微组分的液化

煤液化是将煤通过化学加工过程，使其转化成为液体燃料、化工原料和其他产品的一种新型洁净煤技术。同时煤液化也是目前可大规模采用的缓解我国石油资源供应紧张的有效方法。煤岩显微组分由于其不同的物理结构和化学性质，在液化过程的反应性也不尽相同。

2001 年，Li Wen-hua 等人[18]采用了微反应实验装置研究了马家塔煤及其显微组分的加氢液化活性。三者的反应活性顺序为：原煤 > 镜质组 > 惰质组，三者的沥青烯、水、气产率分别为：原煤 > 惰质组 > 镜质组，镜质组 > 原煤 > 惰质组，惰质组 > 镜质组 > 原煤。反应过程中镜质组和惰质组之间存在着一定的协同效应。叶道敏等人[19]于 2005 年研究了霍林河褐煤显微组分的加氢液化特性。褐煤中惰质组、腐植组、壳质组具有不同的加氢液化活性。腐植组和壳质组易于活化，惰质组则难以活化。2006 年，陈洪博等人[20] [21]对神东煤显微组分的加氢液化性能以及液化残渣进行了研究，450℃的液化温度下，镜质组和壳质组的转化速率为惰质组的 2.6 倍，生成油和沥青烯的速率是惰质组的 2.9 倍。液化残渣的分析显示原煤中的壳质组和镜质组全部转化，惰质组只有部分转化，是未反应煤中的主要成分。Jie Feng 等人[22]于 2013 年采用 DCG 技术分离了灵武、神东、平朔三种煤样的 6 组显微组分并采用了量子化学计算进行了液化活性差异分析。计算结果显示显微组分的比表面积与液化产率无直接联系而平均孔隙则与产率呈正相关，且溶剂的快速循环可以提高液化率。三种煤样中神东煤尤其是镜质组的物理化学性质具有最佳的液化能力。2014 年，Li-jun Jin 等人[23]应用微反应实验装置分别于 N_2 和 H_2 条件下分析了补连塔煤及其显微组分的液化行为。相同条件下，液化的总产率和油产率顺序均如下：镜质组 > 原煤 > 惰质组，而镜质组在 N_2 条件下的总产率和油收率都高于原煤和惰质组在 H_2 条件下的相同指标。

我国作为煤液化技术的领跑者，于 2008 年就已成功运行世界首座煤直接液化装置并运营至今，完成了产业化，因此煤液化技术具有广阔的应用和经济前景。当前煤岩显微组分的液化研究表明在极大多数煤阶和煤种中，壳质组、镜质组的液化活性都要优于惰质组。提高原料煤中的镜质组含量，可以有效提高煤的液化反应活性。然而，研究普遍集中在试验应用研究，煤液化过程的理论研究并未出现。煤液化技术要达到更广泛的应用范围和更高的经济效益，需要在以下两个方面着重探索机理。1) 明确煤种与液化效率两者间的理论关系。2) 不同显微组分表面物理、化学性质与液化效率的关联。一些研究中指出惰质组的转化率和油收率虽然不高但是同样不可忽视，与其他显微组分在液化过程中具有协同作用，只是反应条件和影响因素相对复杂。因此，惰质组对于液化反应的影响急需确切的分析。

3.3. 显微组分的燃烧

煤的燃烧主要是煤中的有机质进行燃烧，而煤岩有机显微组分可以将煤中的有机质分为三类。研究显微组分的燃烧特性有助于进一步探究煤的燃烧性能。

1996 年，路继根等人[24]使用热天平研究了平朔、红阳、大同、东胜四种煤的显微组分的燃烧特性。镜质组的燃烧特征温度高于惰质组。而原生矿物质对于显微组分的燃烧则存在着抑制作用。孙庆雷等人[25]于 2002 年研究了神木煤半焦的燃烧反应性。在相同的热解制焦条件下，镜质组半焦的燃烧性优于惰质组半焦。张军等人[26]也于 2002 年采用了滴管炉对四种煤样显微组分富集物进行了燃烧试验，而惰质组富集物相对于镜质组表现出较差的燃烧性能。2011 年，J. H. Wang 等人[27]使用热重分析法研究了灵武煤及其显微组分的燃烧特性和动力学。惰质组的燃烧活性优于原煤和镜质组，且惰质组的含量越高，混合煤样的燃烧活性也随之增加。而应用缩芯模型可以合理解释样品的燃烧机理。Yingyue Teng 等人[28]于 2016 年从胜利褐煤中提取了富含惰质组的丝质煤和富含腐植组的木质煤。丝质煤的比表面积、起燃温度、整体燃烧性都高于木质煤，且齐次模型和缩芯模型都可以用于描述两者的燃烧过程。

煤炭燃烧作为一种传统的煤炭利用手段以及其带来的环境污染问题，关于显微组分燃烧特性的研究不多，但是从上述研究中可以看出不同煤种中显微组分表现出来的燃烧特性并不一致，存在较大的差异性，其对于煤燃烧的影响需要更加深入的研究。

3.4. 显微组分的热解

煤的热解也称为煤的干馏或热分解，是指煤在隔绝空气的条件下进行加热，在不同的温度下发生一系列的物理变化和化学反应的复杂过程。煤热解的结果是生成气体(煤气)、液体(焦油)、固体(半焦或焦炭)等产品。按煤热解最终温度的不同可分为：高温干馏(950℃~1050℃)，中温干馏(700℃~800℃)和低温干馏(500℃~600℃)，煤的焦化就是高温干馏。

关于煤中显微组分热解的研究较多，笔者将对近十年间的研究进行主要阐述。2006 年，Qinglei Sun 等人[29]将神木煤显微组分分别置于 Ar 和 H_2 中进行了终温 900℃的热解试验。热解产生的气体包括 H_2O、C1-C4、C6H6，镜质组的产气量高于惰质组。Ar 和 H_2 下，H_2O 和 CH_4 具有不同的产生温度和峰分布，说明不同气体条件下的热解反应机理并不相同。常海洲等人[30]于 2008 年的研究表明煤热解的半焦收缩阶段由缓慢收缩、过渡收缩和快速收缩三个阶段构成。镜质组的半焦收缩速率高于惰质组，而神东煤及其显微组分的半焦收缩速率高于平朔煤及其显微组分。2008 年，Hui-Jane Mo 等人[31]使用金刚石对顶毡热解分别在半开放和全封闭系统中，研究了不同煤阶煤种的三种显微组分的生油势和生气势，壳质组产生大量可视类油液体和气体，丝质组(惰质组)则无可视液体和气体产生，一些非高氢镜质组也产生了大量可视液体(比壳质组产生的液体更黑更稠)，说明镜质组的生油势并不局限于其高氢含量。两种系统条件下的生油势结果都类似，但封闭系统中生气势更加明显。Yunpeng Zhao 等人[32]于 2010 年使用固定反应器研究了三种弱还原性煤和单种还原性煤显微组分的热解特性。差热重分析结果显示弱还原性煤的镜质组和惰质组与还原性煤显微组分相比，具有低焦油产率，但是拥有高气产率，产物焦的燃烧活性也更高。2011 年，王利斌等人[33] [34]对神木煤及其显微组分热解过程中气相产物的组成和热解半焦的 CO_2 活化特性进行了研究，在相同的热解温度下，热解气体产物中 H_2、CH_4 的产量：镜质组 > 原煤 > 惰质组；CO、CO_2 的产量：惰质组 > 原煤 > 镜质组。在相同的实验条件下，热解半焦的 CO_2 活化性能为：镜质组 > 原煤 > 惰质组。Rohan Stanger 等人[35]于 2013 年在显微组分热解过程中使用计算机辅助热分析(CATA)结合位移和压力测量装置测量热膨胀，分析吸热、放热等行为。热解的脱挥发分阶段中出现了吸热和放热区，镜质组相对于惰质组表现出了更强的放热性，热解过程中的热膨胀和散热性程度与样品中的镜质组含量相关。赵伟等人[36]于 2014 年分析了神府煤及其显微组分的低温热解特性。研究结果显示煤样中镜质组的含量越高，热解的焦油产率越高，而随着惰质组含量的增加，焦油产率降低，半焦收率提高。

近十年内大量的热解研究均表明在极大多数煤种中壳质组、镜质组的热解特性总体明显优于惰质组，但同样有研究指出惰质组在热解过程中较高的气产率和协同作用不可忽视。但当前煤热解研究主要集中在试验分析方面，显微组分的热解机制方面的理论研究十分缺乏。煤热解技术作为煤气化以及煤液化技术不可或缺的前期阶段，是煤炭清洁利用技术的支撑。未来煤热解技术应着重于解决两个问题 1) 显微组分在热解过程中不同阶段的分解机制。2) 惰质组对热解过程的协同作用原理。煤热解阶段理论研究的完善不仅可以提高煤热解的效率，并将极大促进煤气化和液化技术的发展。

4. 结论

通过对煤岩显微组分分离技术发展的纵观，可以看出随着对煤炭高效利用及洁净煤技术需求的日益增加，煤岩显微组分分离技术不断求新发展，相关的理论和试验研究不断涌现。现有的分离技术中，湿

法分选的相关研究较为深入。其中，浮选法不仅节约了沉浮分离法和 DCG 梯度离心法的繁琐步骤，且进入了半工业试验规模，提高了显微组分富集产量；而新出现的回流分级技术更是较大程度地提高了显微组分的富集率，但两种湿法技术在后期对超细颗粒的过滤和干燥都存在很大障碍。作为干法分选的摩擦电选技术，由于显微组分表面电性质研究难度较高以及此项技术的应用范围较小，近期内尚未出现显微组分分离相关研究。然而此项技术具备了天然的分选超细颗粒适用性以及免脱水干燥优势，具有更广阔的分离显微组分的研究和发展空间。

煤岩有机显微组分的应用技术中只有热解和液化的研究相对成熟且具有较高的实际应用价值和广阔的经济前景，但仍然存在大量的研究空间。尽管大多数研究均表明显微组分中壳质组及镜质组的热解、液化活性高于惰质组，但是惰质组也具有一定的活性和协同作用，惰质组在反应过程中的活性及其确切的作用机制需要进一步地深入研究。

基金项目

国家自然科学基金项目(U1361104)；江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

参考文献 (References)

[1] Zhang, L., Liu, W.L. and Men, D.P. (2014) Preparation and Coking Properties of Coal Maceral Concentrates. *International Journal of Mining Science and Technology*, **24**, 93-98. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.12.016

[2] Dyrkacz, G.R., Bloomquist, C.A.A. and Horwitz, E.P. (1981) Laboratory Scale Separation of Coal Macerals. *Separation Science and Technology*, **16**, 1571-1588. https://doi.org/10.1080/01496398108058316

[3] Arnold, B.J. and Aplan, F.F. (1986) Coal Froth Flotation: The Response of Coal and Mineral Particles to Reagent and Circuit Variations: Advances in Mineral Processing. *Society of Mining Engineers*, 351.

[4] Honaker, R.Q., Mohanty, M.K. and Crelling, J.C. (1996) Coal Maceral Separation Using Column Flotation. *Minerals Engineering*, **9**, 449-464. https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00030-1

[5] Shu, X.Q., Wang, Z.N. and Xu, J.Q. (2002) Separation and Preparation of Macerals in Shenfu Coals by Flotation. *Fuel*, **811**, 495-501. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00106-5

[6] Barraza, J. and Pineres, J. (2005) A Pilot-Scale Flotation Column to Produce Beneficiated Coal Fractions Having High Concentration of Vitrinite Maceral. *Fuel*, **84**, 1879-1883. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.021

[7] Jorjani, E., Esmaeili, S. and Khorami, M.T. (2013) The Effect of Particle Size on Coal Maceral Group's Separation Using Flotation. *Fuel*, **114**, 10-15. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.025

[8] Xie, W., Stanger, R., Lucas, J., *et al*. (2013) Coal Macerals Separation by Reflux Classification and Thermo-Swelling Analysis Based on the Computer Aided Thermal Analysis. *Fuel*, **103**, 1023-1031. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.061

[9] Tran, Q.A., Stanger, R., Xie, W., *et al*. (2016) Maceral Separation from Coal by the Reflux Classifier. *Fuel Processing Technology*, **143**, 43-50. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.11.009

[10] Inculet, I.I., Bergougnou, M.A. and Brown, J.D. (1982) Electrostatic Beneficiation of Coal. In: Liu, Y.A., Ed., *Physical Cleaning of Coal—Present and Developing Methods*, Marcel Dekker, New York, 87-131.

[11] Zhou, G. and Brown, J.D. (1988) Coal Surface Conditioning for Electrostatic Separation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **66**, 858-863. https://doi.org/10.1002/cjce.5450660521

[12] Hower, J.C., Ban, H., Schaefer, J.L. and Stencel, J.M. (1997) Maceral/Microlithotype Partitioning through Triboelectrostatic Dry Coal Cleaning. *International Journal of Coal Geology*, **34**, 277-286. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00026-8

[13] 谢克昌, 李文英, 朱素渝. 用差热分析技术研究煤岩显微组分的加压气化动力学[J]. 燃料化学学报, 1994, 22(3): 276-280.

[14] 孙庆雷, 李文, 李保庆. 神木煤显微组分半焦的气化特性和气化动力学研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 92-96.

[15] Xie, K., Lin, J., Li, W., Chang, L., Feng, J. and Zhao, W. (2005) Formation of HCN and NH3 during Coal Macerals Pyrolysis and Gasification with CO_2. *Fuel*, **84**, 271-277. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.07.012

[16] 丁华, 姜英, 李文华. 升温速率及水蒸气分压改变对神华煤焦及其显微组分焦气化反应性的影响[J]. 煤炭技术, 2009, 13(6): 64-67.

[17] Wang, J.H. and Chang, L.P. (2015) Pyrolysis and Gasification Reactivity of Several Typical Chinese Coals and Their Macerals. *Energy Sources Part A*: *Recovery*, *Utilization*, *and Environmental Effects*, **37**, 670-678. https://doi.org/10.1080/15567036.2011.594857

[18] Li, W., Huo, W., Shu, G., Bai, X. and Dai, H. (2001) Hydroliquefaction Characteristic of Majiata Coal and Its Macerals Components. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, **29**, 104-107.

[19] 叶道敏. 霍林河褐煤显微组分加氢液化性状的研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33(6): 1-5.

[20] 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.

[21] 陈洪博, 李文华, 姜英, 等. 神东煤液化残渣显微组分的特征与分类研究[J]. 燃料化学学报, 2006, 34(5): 513-518.

[22] Feng, J., Lia, J. and Li, W. (2013) Influences of Chemical Structure and Physical Properties of Coal Macerals on Coal Liquefaction by Quantum Chemistry Calculation. *Fuel Processing Technology*, **109**, 19-26. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.09.033

[23] Jin, L., Han, K., Wang, J. and Hu, H. (2014) Direct Liquefaction Behaviors of Bulianta Coal and Its Macerals. *Fuel Processing Technology*, **128**, 232-237. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.033

[24] 路继根, 邱建荣, 沙兴中, 等. 用热重法研究我国四种煤显微组分的燃烧特性[J]. 燃料化学学报, 1996, 24(4): 329-334.

[25] 张军, 汉春利, 王夕华, 等. 煤显微组分富集物燃烧特性滴管炉试验研究[J]. 燃料科学与技术, 2002, 8(5): 403-406.

[26] 孙庆雷, 李文李, 保庆. 神木煤显微组分半焦燃烧特性[J]. 化工学报, 2002, 53(1): 92-95.

[27] Wang, J.H., Li, F., Chang, L.P. and Xie, K.C. (2011) Combustion Characteristics and Kinetics of Lingwu Coal and Its Macerals. *Energy Sources Part A*: *Recovery*, *Utilization*, *and Environmental Effects*, **33**, 529-538. https://doi.org/10.1080/15567030903097020

[28] Teng, Y., Liu, Y., Liu, Q. and Li, C. (2016) Macerals of Shengli Lignite in Inner Mongolia of China and Their Combustion Reactivity. *Journal of Chemistry*, **2016**, Article ID: 2513275. https://doi.org/10.1155/2016/2513275

[29] Sun, Q., Li, W., Chen, H. and Li, B. (2006) Thermogravimetric-Mass Spectrometric Study of the Pyrolysis Behavior of Shenmu Macerals under Hydrogen and Argon. *Energy Sources Part A*: *Recovery*, *Utilization*, *and Environmental Effects*, **28**, 1281-1294. https://doi.org/10.1080/009083190933834

[30] 常海洲, 曾凡桂, 李文英. 煤及其显微组分热解过程中的半焦收缩动力学[J]. 物理化学学报, 2008, 24(4): 675-680.

[31] Mo, H., Huang, W. and Machnikowsk, H. (2008) Generation and Expulsion of Petroleum from Coal Macerals Visualized *In-Situ* during DAC Pyrolysis. *International Journal of Coal Geology*, **73**, 167-184. https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.05.005

[32] Zhao, Y., Hu, H., Jin, L., He, X. and Zhu, S. (2010) Pyrolysis Behavior of Macerals from Weakly Reductive Coals. *Energy Fuels*, **24**, 6314-6320. https://doi.org/10.1021/ef101026u

[33] 王利斌, 孙会青. 神木煤及其显微组分热解过程中气相产物组成的研究[J]. 转化利用, 2011, 17(4): 30-33.

[34] 王利斌, 白效言, 孙会青. 神木煤显微组分热解半焦 CO_2 活化特性研究[J].煤炭燃烧, 2011, 17(2): 46-49.

[35] Stanger, R., Xie, W., Wall, T., Lucas, J. and Mahoney, M. (2013) Dynamic Behaviour of Coal Macerals during Pyrolysis Associations between Physical, Thermal and Chemical Changes. *Proceedings of the Combustion Institute*, **34**, 2393-2400. https://doi.org/10.1016/j.proci.2012.07.003

[36] 赵伟, 张晓欠, 周安宁. 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): 526-533.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：cce@hanspub.org