

侏罗纪烟煤煤岩组分分离富集的研究进展

屈进州^{1,2}, 李振^{1,2}, 赵阳^{1,3}, 赵伟^{1,2}, 周安宁^{1,2}, 周恺¹, 任瑞晨⁴

1. 西安科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710054;
2. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021;
3. 国家能源集团神东洗选中心, 陕西 神木 719315;
4. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000

中图分类号: TQ536.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)02-0123-06
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.02.017

摘要 侏罗纪烟煤是一种理想的动力用煤和化工原料,但由于其惰质组含量高(多数>35%),严重制约了侏罗纪煤的转化利用效率,并且由此产生严重的资源浪费和环境污染。煤炭精细加工与分质转化是提高侏罗纪烟煤转化效率与产品质量、减少废渣与二氧化碳排放的重要举措。针对该煤精细加工(煤岩组分分离富集)中存在的问题,从煤岩组分的表面结构和性质、选择性解离、常规分离富集方法等方面综述了近年的研究进展,分析了主要煤岩组分之间的表面结构和性质差异、最佳解离粒度的选择、常规分离富集方法的局限性,指出了基于油泡表面性质调控的油泡浮选方法可能成为煤岩组分高效分离富集的新方法。

关键词 侏罗纪烟煤;煤岩组分;重选;浮选;油泡浮选

随着我国煤炭资源开发的战略性西移,储量丰富、煤质优良的西北地区侏罗纪煤已成为煤炭资源生产和供应的重要组成部分,其精细加工和分质利用研究已成为近年关注的热点。侏罗纪煤约90%属于低阶烟煤,具有低硫、低灰、低磷、中高发热量等特点,是一种理想的动力用煤和化工原料。但由于其惰质组含量高(多数>35%)^[1],严重制约了侏罗纪煤的转化利用效率,并且由此产生严重的资源浪费和环境污染。惰质组含量高不仅会导致煤的黏结性和成浆性能差,而且也会导致煤的液化和气化性能降低^[2]。因此,有效进行煤岩组分分离富集,实现不同煤岩组分的分质转化利用,将会有力促进侏罗纪高惰质组烟煤的绿色高效利用^[3,4]。煤岩组分分离后,富镜质组煤可进行较大比例的配煤炼焦、热解制氢—热解焦气化、煤液化,以及制备煤基复合材料;而富惰质组煤可作为制备碳素材料的原料或燃料等。

本文立足煤炭绿色高效分质加工利用的需求,从煤岩组分表面结构与性质、选择性解离和分离富集等

方面综述了煤岩组分分离富集的研究进展,并指出了煤岩组分高效分离富集方法的可能方向。

1 煤岩组分表面结构与性质研究

1.1 煤岩组分的表面结构研究

煤岩组分的表面结构性质对其分选具有决定作用,煤岩组分之间的差异是分选的基础。常海洲等^[5]基于XPS对煤表面结构的研究表明,镜质组表面基团的C-C、C-H的含量较高,C-O含量较低;惰质组表面C-O含量较高,而C-C、C-H的含量低。Machnikowska等^[6]利用漫反射红外技术(DRIFT)的研究发现,低阶煤煤岩显微组分中-OH基团以游离和氢键的形式存在。Shu等^[7]、段旭琴等^[8]、赵世永^[9]、陈跃等^[10]进一步对侏罗纪烟煤(神府煤、黄陇煤)的研究表明,富镜质组煤中含有较多的烷基侧链、阳离子型基团(-NH₂、-NH等);而富惰质组煤中则含有较多的芳香基团和极性含氧官能团(羟基、羧基等);镜质组结

收稿日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金(52004212);陕西省自然科学基金基础研究计划(2019JQ-310);霍英东教育基金会高等院校青年教师基金(171102);2019年陕西省留学人员科技活动择优资助项目(14);西安科技大学大学生创新创业训练计划项目(202010704139)

作者简介:屈进州(1987-),男,甘肃天水人,博士(后),主要研究方向为低阶煤浮选提质,E-mail:qujinzhou@126.com。

通信作者:李振(1983-),男,山东淄博人,博士(后),主要研究方向为煤炭提质/分质加工,E-mail:lizhenac@126.com。

构单元具有比惰质组较低的芳碳率和环缩合度。

镜质组和惰质组在孔隙结构方面也存在较大差异。惰质组具有比镜质组更大的比表面积和孔容积;镜质组在微孔($< 10\text{ nm}$)范围内,小尺寸孔隙相对集中,其平均孔径较小;而惰质组孔隙发达,孔径分布范围广,平均孔径较大^[9,11]。镜质组的孔隙以半封闭孔为主,连通性差,可浮性好;而惰质组的孔隙之间形态均匀,连通性较好,润湿性较好^[9-11]。

1.2 煤岩组分的表面性质研究

煤岩组分的表面性质对分选有重要影响。Arnold和Aplan^[12]发现壳质组的疏水性最强,镜质组次之,惰质组最弱。赵世永^[9]对神府煤的研究表明,镜煤和丝炭的初始接触角相差不大,但镜煤的平衡接触角远大于丝炭(高出73.57%);而丝炭的润湿热大于镜煤(高出25.11%),表现出比镜煤较差的疏水性。赵伟等^[13]采用阳离子电解质 AlCl_3 对煤岩组分的研究表明, AlCl_3 可增大镜质组和惰质组表面润湿性差异,扩大镜质组和惰质组的沉降速率和可浮性差异。刘天绩等^[14]对分选出的神东镜煤和丝炭的研究发现,镜煤的表面比较趋近于正电性,而丝炭表面则更趋近于负电性。李华静等^[15]研究表明,改变体系pH值、添加十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)及 AlCl_3 都有利于增大镜煤与丝炭间表面电性差异,且pH值和药剂量对神府煤煤岩组分Zeta电位的影响具有协同作用。赵伟等^[16]、张洲朋等^[17]采用电化学絮凝方法对神府煤煤岩组分表面可浮性进行了选择性调控,结合酸法刻蚀和氟硅烷表面改性处理,研究了处理前后多孔镍阴极表面微观结构与润湿性变化。褚建萍^[18]对煤岩组分间介电常数差异的研究表明,镜煤、亮煤和富含稳定组的暗煤介电常数较小,而富含惰质组与矿物质的暗煤和丝炭的介电常数较大。何鑫^[19]采用原子力显微镜(AFM)探测出东胜侏罗纪烟煤惰质组具有高表面电势,比镜质组高出0.42V,为两者摩擦电选提供了依据。

2 煤岩组分选择性解离研究

煤岩组分的解离是分离的前提。Honaker等^[20]认为若想使煤岩显微组分获得充分的解离,煤粒粒度须小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。但随煤粉碎粒度的降低,粉碎/磨矿功耗将显著增大,煤粒表面性质将发生明显改变,不利于后续分选的进行。因而,需要适合煤岩显微组分解离与分选的最佳解离粒度^[21]。门东坡^[21]以有用矿物解离度达到85%为标准时,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 mm 、 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%。段旭琴等^[22]对神府煤煤岩组分的研究表明,试验煤样粒度小于 0.074 mm 时,惰质组富集率达到96.40%;粒度为 $0.175\sim 0.125\text{ mm}$ 时,镜质组富集率达到95.16%。赵世永^[9]对神府煤破碎解离的研究发现,当破碎粒度达到 $0.074\sim 0.045\text{ mm}$ 时,煤岩组分的解离度可达到92.30%。Jorjani等^[23]通过入料粒度对煤岩组分浮选分离富集影响的研究表明,镜质组主要富集于 $< 40\text{ }\mu\text{m}$ 粒级,粒度具有与其它浮选因素同等重要的作用。蔡昌凤^[24]对柠条塔煤的研究认为煤中丝炭富集于 $< 0.043\text{ mm}$ 极细粒级。

微波对煤岩组分的选择性解离具有积极作用。赵伟等^[25]研究显示,球磨过程中微波辐照对神府丝炭的影响较镜煤显著,可提高微波场中煤岩组分破碎的差异性和选择性。李振等^[26]、Li等^[27]进一步研究了西部典型高惰质组煤微波诱导裂纹的形成,结果表明:裂纹数量和微波能量之间存在线性递增的关系,裂纹数量在 $0.125\sim 0.074\text{ mm}$ 粒度范围内达到最大;结合扫描电镜和煤岩光片,获得了微波诱导作用下高惰质组煤具有的界面裂纹、组内裂纹、差异性裂纹3种裂纹生成模型。

3 煤岩组分的分离富集研究

煤显微组分的分离方法有手选法、比重法、离心法、浮选法和电选法等^[28,29]。目前主要集中在重选和浮选两个方面。

3.1 重选法

基于密度差异的煤岩组分重力分离研究方面,Dormans等^[30]提出了分离煤岩显微组分的比重法;Dyrkacz和Horwitz^[31]在上述基础上又发展了等密度梯度离心分离技术(DGC),此方法是目前最通用的煤岩显微组分分离方法,但其局限在于所得物质数量较少,每次分离的样品仅为 2 g ^[32]。陈洪博和张宇宏^[33]采用多种方法对神东煤煤岩组分的分离富集结果表明,手选法和浮沉法可得到纯度75%以上的煤岩组分富集物,而离心法则可得到90%以上的组分富集物。门东坡^[21]研究了神东长焰煤、开滦东欢坨气煤和钱家营肥煤煤岩组分在最佳破碎粒度下的浮沉分离(1.33 g/cm^3),产品中镜质组含量分别为86.05%、89.52%和90.54%。Gagarin^[34]提出了一种以煤的组成(煤岩组分与矿物质)为密度的分布函数,用于模拟煤岩组分按密度的分离富集。陶有俊等^[35]、朱子祺^[36]、姜宇帅^[37]采用强化重力场的Falcon离心分选机对神东煤煤岩显微组分进行了富集,得到了较为理想的指标。何鑫^[19]

依据惰质组与镜质组表面荷电的差异,研究了神东煤煤岩组分的摩擦电选分离富集。

3.2 浮选法

浮选法是当前煤岩组分分离富集中具有工业应用前景的研究方向,近几年来,有很多学者开展了相关研究。Shu 等^[7]对神府煤岩组分的浮选分离富集结果表明,当浮物产率小于 69% 时,浮物中的镜质组含量可达 80% 以上。周艳君^[38]以十二胺为捕收剂对神府煤煤岩组分进行浮选,产物中镜质组和惰质组富集率分别达到 83.29% 和 47.44%。龙江等^[39]选用阳离子型 CTAB 为新疆煤煤岩组分浮选药剂,在最佳工艺条件下可较好地浮出壳质组和镜质组。赵世永^[9]对 < 0.2 mm 粒级煤岩试样,在添加 AlCl_3 情况下,以阳离子捕收剂十二烷基三甲基氯化铵 (DTAB) 进行浮选时,镜质组富集率可达到 86.96%,惰质组富集率达到 70.80%。宋强^[40]以最优浮选工艺条件得到了与纯镜质组密度相近的精煤产品。

赵伟等^[25]研究了神府煤煤岩组分的微波辐照浮选,在微波辐射时间 2 min 时,浮选镜质组和惰质组富集率分别提高 34.9 和 20.1 个百分点。武乐鹏等^[41]探究了大柳塔煤煤岩组分的超声波辅助浮选,在超声频率为 100 kHz 时,获得最大镜质组富集率 (76.98%)。李伟明^[42]对寸二煤煤岩组分进行了油团聚分选和液态 CO_2 相变分选富集试验,得到了镜质组含量为 76.87% 和 79.81% 的精煤产品。

在煤岩组分的柱浮选分离方面, Barraza 和 Piñeres^[43]通过捕收剂和 pH 值的调控,在控制规模的浮选柱上成功富集了镜质组,这为工业规模煤岩组分分离提供了基础。Kopparthi 等^[44]采用浮选柱对 A、B 两煤样进行镜质组浮选富集试验,在最大产率下得到了回收率为 84% 和 93% 的富镜质组精煤产品。Hower 等^[45]也采用浮选柱从弗吉尼亚煤中分选出了富镜质组精煤产品。Nag 等^[46]采用浮选柱分离了印度非炼焦煤中的活性组分 (非惰质组),并将其用于冶金炼焦配煤,拓宽了非炼焦煤的利用途径,提高了煤炭的利用效率。

3.3 常规富集方法的优势与局限

重选法在煤岩组分 (特别是镜质组) 解离粒度较大 (通常大于浮选粒度上限)、赋存与分布状态简单、对分离产物单一煤岩组分含量要求不高的情况下具有独特优势,可以进行大规模的工业化富集 (如采用工业型重介质旋流器分选侏罗纪烟煤),为煤化工等下游工业企业提供高品质原料,且可以明显降低富集成本。但其在解离粒度较小或煤岩组分赋存复杂时应用受

限,在高纯度分离产物含量方面亦存在不足。

在煤岩组分解离粒度较小的情况下,浮选法具有较大的工业应用前景,在已分离产物中单一煤岩组分含量和富集比提升方面存在较大优势。国内外学者也开展了诸多研究和探索,取得了一定的进展,但由于其不同煤岩组分之间浮选选择性、分离效率等方面的局限,煤岩组分的分离一直处于实验室规模。其主要原因是煤岩组成复杂,不同煤岩组分的表面结构性性质虽有一定差异,但受多种因素影响 (如表面基团、孔隙类型及分布、Zeta 电位等),致使煤岩组分之间差异不够显著,达不到高选择性分选。

4 油泡浮选法分离煤岩组分的可能性

近年来,以油泡为矿物颗粒浮选载体的新方法逐渐被学者们采用。针对加拿大细粒难选油砂矿浮选, Liu 等^[47]、Xu 等^[48]提出应用活性油泡 (被含有捕收剂的油类薄层所包覆的气泡,如图 1) 作为浮选载体的油泡浮选方法。活性油泡浮选矿物颗粒是在油膜与矿物颗粒吸附的同时,活性油泡也与矿物黏附在一起,一步完成了气泡与矿物颗粒的相互作用 (传统浮选中为捕收剂 - 颗粒作用、气泡 - 颗粒黏附两步)。合理调整活性油泡表层油膜中的捕收剂 (表面活性剂) 的种类和浓度,可灵活调控活性油泡表面性质^[49]。

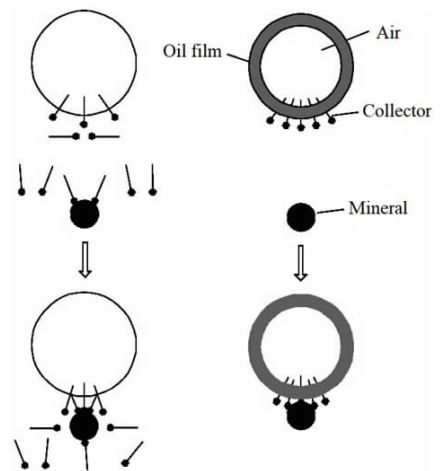


图 1 常规气泡与活性油泡的对比:a—常规气泡;b—活性油泡

Fig. 1 Comparison of conventional air bubble (a) and reactive oily bubble (b)

与常规的气泡相比,活性油泡具有可以最大限度地减少无用矿物颗粒的活化;降低水相中分散的与无用固体上吸附的捕收剂用量;避免浮选药剂与矿浆中其它化学物质间的不必要的协同作用;可以在油/水界面获得较高的捕收剂分子局部浓度而提高其捕集能力;可通过目的矿物上的活性位点与油/水界面上捕收

剂分子间的化学和/或电化学作用,使活性油泡仅捕获目的颗粒,提高其浮选选择性等优点^[47,48]。

根据煤岩组分的结构与性质,煤岩组分中的镜质组和惰质组及其所组成的宏观煤岩(镜煤、丝炭)之间在客观上确实存在一定的表面结构与性质差异,如表面基团上,镜质组表面主要活性位点为阳离子型的含氮基团,惰质组表面主要活性位点为极性含氧官能团等。这些存在的差异恰好能够匹配油泡表面性质,通过油泡表面性质的调控,将能使活性油泡有选择性地只捕集一种煤岩组分颗粒(如镜质组)。这为煤岩组分的高效分离富集从理论上提供了可能。

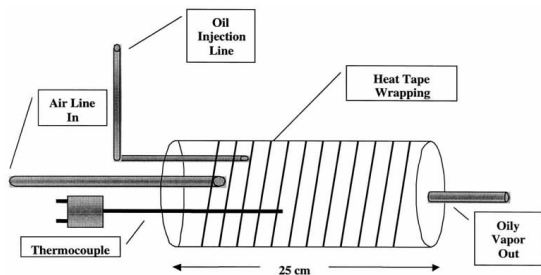


图2 油泡闪蒸装置示意图
Fig. 2 Schematic drawing of oily bubble flashing device

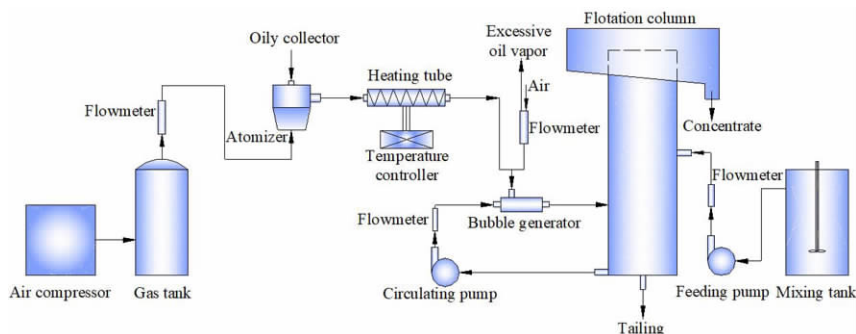


图3 油泡浮选试验系统示意图
Fig. 3 Schematic drawing of oily bubble flotation system

由于气泡对煤岩组分表面活性位点的选择性有限,致使其浮选效率达不到预期要求。活性油泡因矿化方式的改变,具有药剂消耗低、回收能力强、浮选选择性好等特点,具有比气泡更大的优势,通过调控油泡表面活性与煤岩组分表面活性位点进行的选择性矿化将更有利于煤岩组分的浮选。因此,油泡浮选法为煤岩组分的分离富集提供了新的思路和方法,其相关研究将进一步丰富煤炭浮选理论,为侏罗纪烟煤煤岩组分高效分离富集提供理论与技术支撑,具有较好的发展前景。

5 结论

(1)煤岩组分的分离富集是煤炭精细加工和分质

Wallwork等^[50]利用油泡闪蒸装置(图2)对难选氧化油砂矿进行了油泡分选试验,与不添加煤油相比,油泡分选的回收率提高近80个百分点。于伟和王永田^[51]采用自制的烃油闪蒸油泡浮选系统研究了神府低阶煤的浮选行为,在烃油捕收剂用量为2.5 kg/t时,获得了高产率(>70%)的低灰精煤(<11.2%)。屈进州^[52]从油泡性能及其对低阶煤的润湿性和黏附能量方面探讨了油泡浮选优越性,基于自行设计的油泡分选系统(图3)试验得出,活性油泡浮选方法可以显著降低低阶煤的浮选药耗(降低91.14%),提高其浮选选择性(精煤灰分11.16%)。安泉^[53]对神府矿区不同煤层侏罗纪烟煤及其镜质组和惰质组的表面结构和性质进行了研究,探讨了改性油泡对不同煤层煤样及其煤岩组分作用效果的影响。结果表明:改性药剂的加入可以扩大镜质组与惰质组之间的差异性,在相同油泡浮选的精煤回收率条件下,镜质组的药剂消耗更小。上述研究内容为侏罗纪烟煤的活性油泡浮选分离富集提供了重要支持,进一步佐证了活性油泡浮选方法的可能性。

综上所述,侏罗纪烟煤煤岩组分在表面结构与性质上虽然存在一定的差异,但对于常规气泡浮选来说,

利用的基础,侏罗纪烟煤中镜质组和惰质组在表面结构和性质上确实存在一定的差异(如表面基团、孔隙等),为后续分离富集提供了依据。

(2)煤岩组分的解离是其分离富集的前提,但达到完全解离(如10 μm)后并不利于分离过程的进行,需要同时考虑煤岩显微组分解离与分选过程,并合理考虑微波等手段辅助煤岩组分的解离,以高效低耗地确定最佳的解离粒度。

(3)重选法、常规浮选法等常规煤岩组分分离富集方法尽管取得了一些研究进展,但在分离效率、分离组分含量及分离过程选择性等方面存在局限性。

(4)活性油泡因矿化方式的改变,具有比常规气

泡更大的优势,通过调控油泡的表面活性,可使油泡仅捕获单一煤岩组分颗粒。这种方法更有利于侏罗纪烟煤煤岩组分高效分离富集。

参考文献:

- [1] 黄文辉,唐书恒,唐修义,等. 西北地区侏罗纪煤的煤岩学特征[J]. 煤田地质与勘探,2010,38(4):1-6.
- [2] CHEN P, MA J. Petrographic characteristics of Chinese coals and their application in coal utilization processes[J]. Fuel, 2002, 81(11): 1389-1395.
- [3] 甘建平,马宝岐,尚建造,等. 煤炭分质转化理念与路线的形成和发展[J]. 煤化工,2013,41(1):3-6.
- [4] 舒新前,王祖谟,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.
- [5] 常海洲,王传格,曾凡桂,等. 不同还原程度煤显微组分组表面结构XPS对比分析[J]. 燃料化学学报,2006,34(4):389-394.
- [6] MACHNIKOWSKA H, KRZTONA, MACHNIKOWSKI J. The characterization of coal macerals by diffuse reflectance infrared spectroscopy[J]. Fuel, 2002, 81(2): 245-252.
- [7] SHU X, WANG Z, XU J. Separation and preparation of macerals in Shenfu coals by flotation[J]. Fuel, 2002, 81(4): 495-501.
- [8] 段旭琴,王祖谟,曲剑午. 神府煤惰质组与镜质组的结构性质研究[J]. 煤炭科学技术,2004,32(2):19-23.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 段旭琴,曲剑午,王祖谟. 低变质烟煤有机显微煤岩组分的孔结构分析[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(2):224-228.
- [12] ARNOLD BJ, APLAN FF. The hydrophobicity of coal macerals[J]. Fuel, 1989, 68(5): 651-658.
- [13] 赵伟,赵世永,杨志远,等. AlCl₃对煤岩组分浮选分离的影响[J]. 煤炭学报,2015,40(S1):185-190.
- [14] 刘天绩,祁威,舒新前,等. 神华煤煤岩组分荷电机理探讨[J]. 选煤技术,2004(4):87-90+92.
- [15] 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+32.
- [16] 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.
- [17] 张洲朋,赵伟,李振,等. 电极表面结构对电浮选中氢气气泡物理特征的影响[J]. 矿产保护与利用,2020,40(5):96-102.
- [18] 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+6.
- [19] 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.
- [20] HONAKER RQ, MOHANTY MK, CRELLING JC. Coal maceral separation using column flotation[J]. Minerals Engineering, 1996, 9(4): 449-464.
- [21] 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.
- [22] 段旭琴,杨慧芬,王祖谟. 低变质烟煤有机显微煤岩组分的润湿性[J]. 煤炭学报,2009,34(2):243-246.
- [23] JORJANI E, ESMAEILI S, KHORAMI TM. The effect of particle size on coal maceral group's separation using flotation[J]. Fuel, 2013, 114: 10-15.
- [24] 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.
- [25] 赵伟,周安宁,李远刚. 微波辅助磨矿对煤岩组分分离的影响[J]. 煤炭学报,2011,36(1):140-144.
- [26] 李振,付艳红,周安宁,等. 高惰质组煤微波诱导裂纹特征的研究[J]. 煤炭学报,2017,42(S1):247-252.
- [27] LI Z, FU Y, ZHOU A, et al. Effect of multi-intensification on the liberation of maceral components in coal[J]. Fuel, 2019, 237: 1003-1012.
- [28] 王美丽,舒新前,朱书全. 煤岩组分分离与分选的研究[J]. 选煤技术,2004(4):33-36+92.
- [29] 张磊. 开滦煤显微组组分分离及其富集物的特性研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2015.
- [30] DORMANS H, HUNRJENS F, VAN KREVELEN DW. Chemical structure and properties of coal XX-composition of individual maceral (Vitrinites, Fusinites, Micrinites and Exinites) [J]. Fuel, 1957, 36(3): 321-339.
- [31] DYRKACZ GR, HORWITZ EP. Separation of coal macerals[J]. Fuel, 1982, 61(1): 3-12.
- [32] 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(自然科学版),2013,40(1):48-55.
- [33] 陈洪博,张宇宏. 煤岩显微组分的分离与富集研究[J]. 煤质技术,2012(6):6-9.
- [34] GAGARIN SG. Coal enrichment with separation into fractions by density[J]. Coke and Chemistry, 2009, 52(3): 89-93.
- [35] 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+197.
- [36] 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.
- [37] 姜宇帅. 强化重力场下低阶烟煤煤岩显微组组分分离[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.
- [38] 周艳君. 浮选法分离神府煤煤岩显微组组分的研究[D]. 西安:西安科技大学,2013.
- [39] 龙江,杨志远,屈世存,等. 浮选法分离富集新疆煤煤岩组分的试验研究[J]. 煤炭学报,2013,38(S2):489-494.
- [40] 宋强. 低阶煤显微组组分浮选分离试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2015.
- [41] 武乐鹏,宋强,舒新前. 超声处理对显微组组分浮选分离及热解影响研究[J]. 煤炭工程,2019,51(11):148-153.
- [42] 李伟明. 低阶烟煤中镜质组的疏水聚团富集方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [43] BARRAZA J, PIÑERES J. A pilot-scale flotation column to produce beneficiated coal fractions having high concentration of vitrinite maceral[J]. Fuel, 2005, 84: 1879-1883.
- [44] KOPPARTHI P, SINGH R, NAG D, et al. Vitrinite maceral separation using column flotation[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2018, 38(1): 13-29.
- [45] HOWER JC, KUEHN KW, PAREKH BK, et al. Maceral and microliothotype beneficiation in column flotation at the powell mountain coal mayflower preparation plant, Lee County, Virginia[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 67(1): 23-33.
- [46] NAG D, KOPPARTHI P, DASH PS, et al. Enrichment of reactive macerals in coal: its characterization and utilization in coke making[J]. Metallurgical Research & Technology, 2018, 115(2): 209.

- [47] LIU J, MAK T, ZHOU Z, et al. Fundamental study of reactive oily - bubble flotation[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(9): 667 - 676.
- [48] XU Z, LIU J, ZHOU Z. Selective reactive oily bubble carriers in flotation processes and methods of generation and uses thereof: US, 6959815 B2[P]. 2003 - 11 - 27.
- [49] 周芳,池汝安. 气泡、油泡和活性油质气泡在浮选中的应用和机理探讨[J]. 金属矿山, 2018 (4): 27 - 34.
- [50] WALLWORK V, XU Z, MASLIYAH J. Bitumen recovery with oily air bubbles[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2003, 81: 993 - 997.
- [51] 于伟,王永田. 神府低阶煤油泡浮选试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 152 - 157 + 76.
- [52] 屈进州. 低阶煤活性油泡浮选行为与浮选工艺的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [53] 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.

Advances in Separation and Enrichment of Jurassic Bituminous Coal Macerals

QU Jinzhou^{1,2,*}, LI Zhen^{1,2}, ZHAO Yang^{1,3}, ZHAO Wei^{1,2}, ZHOU Anning^{1,2}, ZHOU Kai¹, REN Ruichen⁴

1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, Shaanxi, China;
3. CHN Energy Shendong Coal Processing Centre, Shenmu 719315, Shaanxi, China;
4. School of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China

Abstract: Jurassic bituminous coal is an ideal power coal and chemical raw material. However, due to its high content of inertinite in that coal (mostly >35%), the conversion and utilization efficiency of that coal was constrained severely, and the waste of resources and environmental pollution was caused seriously. Fine processing and qualitative conversion of coals are important measures to improve the conversion efficiency and product quality of Jurassic bituminous coal, and reduce emissions of waste residue and carbon dioxide. Aiming at the problems of separation and enrichment of coal macerals, advances in the surface structure and properties, selective liberation, conventional separation and enrichment methods of coal macerals were summarized in recent years. The differences of surface structure and properties between the vitrinite and inertinite, the selection of the optimal liberation granularity, and the limitations of conventional separation and enrichment methods were analyzed, respectively. Finally, it may be a new method for the efficient separation and enrichment of coal macerals that the oily bubble flotation based on the surface activity regulation of oily bubble is proposed.

Key words: jurassic bituminous coal; coal maceral; gravity separation; flotation; oily bubble flotation

引用格式: 屈进州, 李振, 赵阳, 赵伟, 周安宁, 周恺, 任瑞晨. 侏罗纪烟煤煤岩组分分离富集的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 123 - 128.

Qu JZ, Li Z, Zhao Y, Zhao W, Zhou AN, Zhou K, and Ren RC. Advances in separation and enrichment of jurassic bituminous coal macerals[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(2): 123 - 128.