

# 白音华三号露天矿 3-1 煤层直接液化可行性评价

霍超,赵岳,朱开成,张恒利,张建强,赵文扬,徐强

(中国煤炭地质总局勘查研究总院,北京 100039)

**摘要:**为了研究内蒙古白音华煤田褐煤直接液化可行性与煤岩显微组分、煤质参数之间的关系,对三号露天矿 3-1 煤层煤样进行了采样测试与分析,结合前人对于褐煤直接液化相关的煤岩组分和煤质指标研究成果,探究了煤岩惰质组含量、灰分、挥发分、H/C 原子比对褐煤直接液化的影响。研究表明:低惰质组含量、低灰分、高挥发分、高 H/C 原子比的褐煤有利于直接液化;3-1 煤层煤岩显微组分中惰质组含量较低,小于 8.70%,煤质参数中精煤灰分大部分小于 10%,挥发分大于 35%,H/C 原子比大部分大于 0.75。综合分析,3-1 煤层褐煤各项参数符合直接液化指标要求,可作为较理想的直接液化原料煤。

**关键词:**煤直接液化;褐煤液化;白音华煤田;煤岩组分

中图分类号:TQ529.1

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)05-0219-05

## Feasibility evaluation on direct liquefaction of No.3-1 coal seam from No.3 Open-pit Mine in Baiyinhua Coalfield

HUO Chao,ZHAO Yue,ZHU Kaicheng,ZHANG Hengli,ZHANG Jianqiang,ZHAO Wenyang,XU Qiang

(General Prospecting Institute China National Administration of Coal Geology,Beijing 100039,China)

**Abstract:**In order to research the relationship between the direct liquefaction feasibility of lignite in Baiyinhua Coalfield and coal macerals and coal quality parameters, the samples were collected and tested from No. 3-1 coal seam in No.3 Open-pit Mine.In combination with the former researchers' results of coal macerals and coal quality indexes, this paper discussed the effects of inertinite content, ash, volatile content and H/C ratio on direct liquefaction. The results showed that the low inertinite content, low ash content, high volatile content, and high H/C atomic ratio of lignite were favorable for direct liquefaction. The No.3-1 coal seam had a lower content of inertinite, which was less than 8.70%, most of coal ash content of clean coal was less than 10%, volatile matter content was greater than 35%,most H/C atomic ratio was greater than 0.75. Based on the comprehensive analysis, all parameters of No.3-1 coal seam met the requirements of direct liquefaction index and could be used as an ideal direct liquefaction raw material.

**Key words:**coal direct liquefaction;lignite liquefaction;Baiyinhua Coalfield;coal macerals

## 0 引言

煤炭是我国的主体能源和重要工业原料,2015 年国家能源局下发《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020 年)》(国能煤炭[2015]141 号)确定稳步推进现代煤化工产业发展为“十三五”期间煤炭清洁高效利用重点工作之一。煤的分级转化、多元利用是实现煤洁净、高效转化的有效途径<sup>[1-3]</sup>。

煤炭直接液化作为一种清洁的转化利用方式,自 1913 年诞生以来,如何对不同地区、不同煤种的液化性能进行准确评价一直是关注的热点<sup>[4]</sup>。

褐煤是一种变质程度较低的煤,其具有良好的液化活性,是一种适宜煤炭直接液化的煤种<sup>[5]</sup>。我国褐煤约占煤炭总储量的 12.7%<sup>[6]</sup>,但由于褐煤含水量高,热值低,不适宜直接燃烧或长途运输,因此对褐煤采用就地直接液化,不但可提高煤

收稿日期:2018-01-22;责任编辑:代艳玲 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.05.035

基金项目:中国地质调查局地质调查工作资助项目(DD20160187)

作者简介:霍超(1985—),男,山西朔州人,工程师,硕士。E-mail:493578419@qq.com

引用格式:霍超,赵岳,朱开成,等.白音华三号露天矿 3-1 煤层直接液化可行性评价[J].煤炭科学技术,2018,46(5):219-223,108.

HUO Chao,ZHAO Yue,ZHU Kaicheng,et al.Feasibility evaluation on direct liquefaction of No.3-1 coal seam from No.3 Open-pit Mine in Baiyinhua Coalfield[J].Coal Science and Technology,2018,46(5):219-223,108.

炭资源的利用效率,将褐煤转化为高价值的产品(如汽油、柴油等),也可减少褐煤直接燃烧造成的污染<sup>[7-9]</sup>。

褐煤作为液化原料煤,其直接液化过程是比较复杂的化学反应,受很多因素影响。针对褐煤直接液化可行性评价,朱晓苏<sup>[10]</sup>先后对我国各地的气煤、长焰煤和褐煤等煤种进行了液化特性试验研究,最终优选出 14 种液化特性最好的煤种,其中 5 种为褐煤。罗星云<sup>[11]</sup>以国内外先进的煤炭直接液化工艺对煤质的要求为依据,全面系统地分析了云南褐煤的液化性能;舒歌平等<sup>[12]</sup>从煤阶、煤岩组成及煤中矿物质等方面研究了褐煤液化特性,认为褐煤是一种优质的液化用煤。

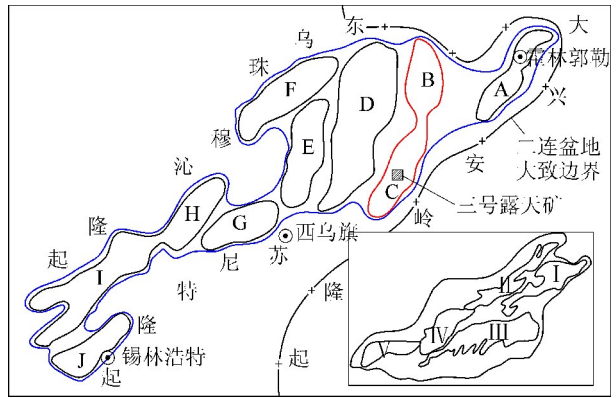
前人对一些地区褐煤直接液化可行性进行了评价,但对内蒙古地区褐煤直接液化性能研究则相对较少。笔者以内蒙古白音华三号露天矿 3-1 煤层为例,通过对煤样进行测试分析,着重从煤岩组分和煤质特征来探讨该煤层褐煤直接液化的可行性,为该地区褐煤直接液化提供科学依据。

1 白音华煤田地质概况

1.1 构造特征

白音华煤田位于内蒙古自治区锡林郭勒盟西乌旗境内,是大兴安岭以西储煤盆地之一,位于二连坳陷(亦称二连盆地群)东端乌尼特坳陷带中<sup>[13-14]</sup>(图

1)。北东~北北东向长条状展布,区内构造较简单,呈向斜斜状。



I—乌尼特坳陷; II—马尼特坳陷; III—腾格尔坳陷;  
IV—乌兰察布坳陷; V—川井坳陷  
A—霍林郭勒断陷; B—迪彦庙断陷; C—巴彦花断陷; D—高力罕断陷;  
E—阿拉达布斯断陷; F—包尔果吉断陷; G—布日敦断陷;  
H—包尔果吉南断陷; I—朝克乌拉断陷; J—吉尔嘎朗图断陷  
图 1 乌尼特坳陷构造单元划分(据文献[14]修改)

Fig.1 Wunite depression tectonic unit division  
(modified by No.14 Literature)

1.2 地层特征

白音华煤田为隐伏煤田,外围有石炭系浅变质岩和侏罗系火山岩出露,其地层分区属天山兴安地层区—兴安分区—西乌旗小区。白音华煤田三号露天矿发育的地层自上而下有第四系、新近系、白垩系、侏罗系等(表 1)。

表 1 白音华三号露天矿地层基本信息

Table 1 Coalfield stratigraphic of No.3 Open-pit Mine of Baiyinhua Coalfield			
地层	厚度/m	岩性特征	
第四系(Q)	0.20~46.80	褐黄色砂土、浅灰色细砂、棕红色亚砂土和少量浅黄色亚黏土	
新近系(N <sub>2</sub> )	0~80.61	褐黄色黏土或砂质黏土,底部含灰白~灰黄色砂砾层	
白垩系下统白音华组(K <sub>1</sub> b)	第四段	>260.00 灰色巨厚层状粉砂岩、粉砂质泥岩,偶夹细砂岩等薄层	
	第三段	<412.14 深灰色粉砂岩、泥岩、各粒级砂岩与煤层互层;含 3 个煤组,为本区唯一含煤段	
	第二段	2.86~221.75 以灰~深灰色巨厚层状细粉砂岩为主,夹细砂岩薄层	
	第一段	66.06~125.19 以灰白、灰绿色砂砾岩与粗粒砂岩互层为主,夹深灰色细粒砂岩	
侏罗系—兴安岭群(J <sub>3</sub> xh)	224.16	灰白色流纹岩、凝灰砾岩,绿灰色铝土岩(厚 11.25 m),白灰、灰绿色细砾岩及粗中细砂岩	

1.3 含煤特征

三号露天矿的含煤地层为白垩系下统白音华组第三段(K<sub>1</sub>b<sup>3</sup>),含 3 个煤组,11 个煤层(由上到下编号为 1 上、1 中、1 下、1-1、1-2、2-1 上、2-1 中、2-1 下、3-1、3-2、3-3 煤层)。3-1 煤层全区发育,赋存深度 32.10~372.40 m,平均 168.23 m。煤层厚度 0.85~39.84 m,平均 18.31 m,煤类属褐煤。

2 煤岩显微组分与液化性能

褐煤直接液化性能与煤中显微组分的种类、含量和结构密切相关,不同显微组分之间液化特性存在较大差异<sup>[15-16]</sup>。在 3 大显微组分中:惰质组属于非活性显微组分,在通常的液化反应条件下难于液化;而腐植组和稳定组统称为活性组分,煤岩中活

性组分含量决定着液化产物和转化率,其含量越高越有利于直接液化。

PARKASH 等<sup>[17]</sup>选取美国 2 种褐煤(Texas 和 North Dakota)进行液化试验对比研究,结果表明腐植组和稳定组与转化率有着较好的正相关关系。李永伦等<sup>[18]</sup>研究了 5 种不同惰质组含量的上湾煤的液化性能,结果表明:惰质组含量越高,煤的转化率和油收率越低。

表 2 白音华三号露天矿 3-1 煤层煤岩显微组分含量

Table 2 Micromacerals content of No.3-1 coal seam from No.3 Open-pit Mine in Baiyinhua Coalfield

有机显微组分+矿物组分质量分数/%							最大镜质组 反射率 $R_{o,max}/\%$
腐植组	惰质组	稳定组	黏土组	硫化物组	碳酸盐组	氧化物组	
78.65~82.10	2.21~8.70	1.15~1.40	0.40~15.7	0~0.30	1.90~7.40	—	0.364~0.385

原煤炭科学研究院北京煤化学研究所通过对全国各地的气煤、长焰煤和褐煤等煤种进行了液化特性试验研究,确定了煤炭直接液化优选煤种的必要条件是:(腐植组+稳定组)含量 $>23.86+100.06 R_{o,max}^{[10]}$ 。

GB/T 23251—2009《煤化工用煤技术导则》中要求直接液化原料煤惰质组含量 $<35.00\%$ ; 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中惰质组含量 $<45.00\%$ 。通过对 3-1 煤层样品测试分析研究,其煤岩组分含量完全符合以上条件,可以作为直接液化的优选原料煤。

### 3 煤质参数与液化性能

前大量的研究成果表明,煤质对褐煤直接液化有着直接的影响,低灰分、高挥发分、高 H/C 原子比有利于褐煤直接液化。

#### 3.1 灰分对液化性能的影响

褐煤直接液化过程中,煤中灰分(主要是煤中的无机组分)的高低对煤的液化率与转化率无明显影响,但对煤转化终端产品的质量和系统的正常操作有着直接影响,会给液化进程带来诸多不便,因此

笔者对 3-1 煤层 4 个褐煤煤样进行了显微煤岩组分测试,结果表明:3-1 煤层有机显微组分变化不大,腐植组质量分数为 78.65%~82.10%;惰质组质量分数分为 2.21%~8.70%;稳定组含量较少,质量分数一般在 1.15%~1.40%。无机显微组分以黏土岩为主,质量分数一般在 0.40%~15.7%,硫化物组、碳酸盐组含量较少,不含氧化物组(表 2)。

煤中的无机组分越低越有利于煤炭直接液化<sup>[19-20]</sup>。

对 3-1 煤层 65 个褐煤煤样进行了煤质测试分析,其原煤灰分在 9.79~27.64%,平均 19.61%;精煤灰分为 7.01~10.66%,平均 8.84%(图 2,表 3)。

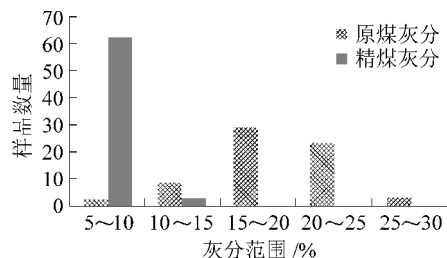


图 2 3-1 煤层煤样灰分分布

Fig.2 Coal samples ash distribution of No.3-1 coal seam

罗星云<sup>[11]</sup>通过对云南褐煤直接液化可行性研究分析,认为加氢液化的原料煤灰分应小于 10%。《煤化工用煤技术导则》中要求直接液化原料煤中灰分 $A_d<10.00\%$ ;《直接液化用原料煤技术条件》将灰分定为小于 12.00%。通过对 3-1 煤层煤样分析测试,其精煤灰分均小于 12.00%(图 3),因此 3-1 煤层通过分选后可作为直接液化原料煤。

表 3 白音华三号露天矿 3-1 煤层煤质分析结果

Table 3 Testing data of coal quality of No.3-1 coal seam from No.3 Open-pit Mine in Baiyinhua Coalfield

项目	工业分析/%		元素分析/%		
	$A_d$	$V_{daf}$	$w(C)_{daf}$	$w(H)_{daf}$	$w(O)_{daf}$
原煤	9.79~27.64	39.96~48.81	66.73~75.29	4.33~5.61	17.17~26.40
精煤	7.01~10.66	39.82~47.30	66.99~76.70	3.98~5.16	16.66~27.06

#### 3.2 挥发分对液化性能的影响

挥发分是煤有机质在高温下热解析出的气态产物,包括煤气和焦油蒸汽。一般来说,煤中挥发分越

高,其越易于液化。司胜利等<sup>[21]</sup>研究了我国西部低煤阶煤的液化性能,结果表明:煤的挥发分与液化性能表现出良好的线性关系。



本次对 3-1 煤层 65 个褐煤煤样(测试 6 个,收集 59 个)进行了煤质测试分析,其原煤挥发分在 39.96~48.81%,平均 46.07%;精煤挥发分在 39.82~47.30%,平均 44.16%(表 3)。

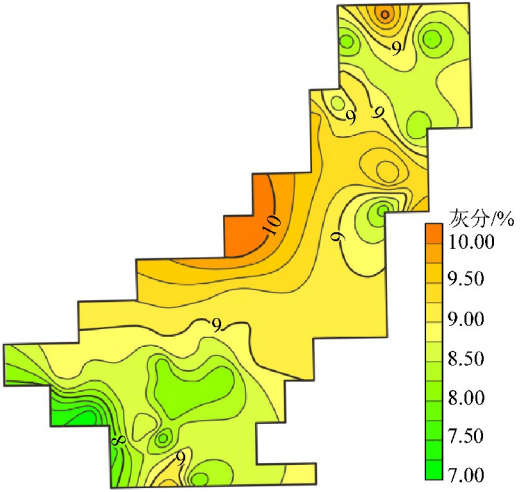


图3 3-1 煤层精煤灰分等值线

Fig.3 Clean coal ash content isogram of No.3-1 coal seam

舒歌平等<sup>[12]</sup>和贺永德<sup>[22]</sup>研究认为直接液化用煤煤种挥发分应大于 35%。《煤化工用煤技术导则》和《直接液化用原料煤技术条件》中均要求直接液化原料煤中挥发分  $V_{daf} > 35\%$ 。通过样品测试分析研究,三号露天矿 3-1 煤层原煤和精煤挥发分均大于 35%(表 3、图 4),由此可见,3-1 煤层挥发分符合直接液化用煤要求。

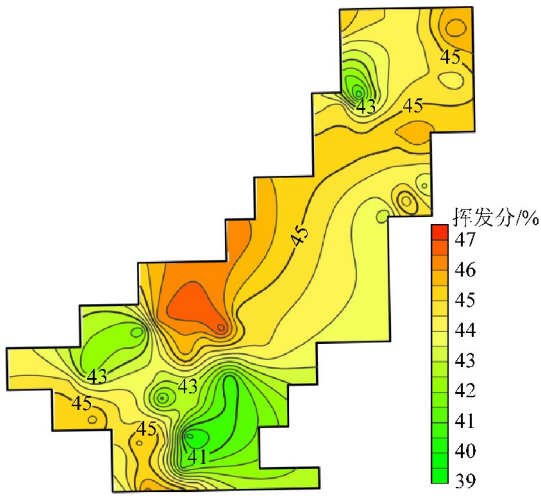


图4 3-1 煤层挥发分等值线

Fig.4 Volatile content isogram of No.3-1 coal seam

3.3 氢碳原子比对液化性能的影响

一般认为,煤中氢碳原子比(H/C)对煤直接液化有着重大的影响。谢崇禹<sup>[23]</sup>和凌开成等<sup>[24]</sup>通过对煤液化试验研究,得出煤中 H/C 比与煤的转化率有着良

好的相关性,H/C 比越高,转化率越大。

本次对 3-1 煤层 63 个褐煤煤样(测试 4 个,收集 59 个)进行煤质测试分析,其碳含量在 66.73~75.29%,平均 71.74%;氢含量在 4.33~5.61%,平均 4.91%;氧含量在 17.17~26.40%,平均 21.19%;H/C 在 0.72~0.93,O/C 在 0.17~0.30(表 3)。

针对褐煤直接液化,朱晓苏<sup>[10]</sup>和罗星云<sup>[11]</sup>研究发现,一般碳含量不应低于 65%,H/C 大于 0.75,O/C 在 0.06~0.26。《直接液化用原料煤技术条件》中要求直接液化原料煤中  $H/C > 0.75$ 。本次 63 个煤样中有 50 个煤样落在该矩形区域内(图 5),占样品总数的 79.36%,说明 3-1 煤层 H/C 原子比和 O/C 原子比表现出了良好的液化性能。

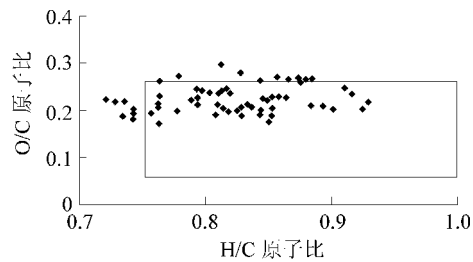


图5 3-1 煤层煤样 H/C 原子比和 O/C 原子比关系

Fig.5 Relationship between H/C atomic ratio and O/C atomic ratio of No.3-1 coal seam

4 直接液化用煤评价结果

笔者以采样化验和资料收集为基础,分析白音华煤田三号露天矿 3-1 煤层褐煤的液化性能,主要侧重于煤岩显微组分(惰质组含量)和煤质(灰分、挥发分、H/C 原子比等)2 个方面 6 项参考指标研究,对以上关键参数进行综合分析和信息叠加,优选出 3-1 煤层符合直接液化用煤有利区(图 6)。面积约 35.33  $\text{km}^2$ (占全区总面积 76.82%),估算直接液化用煤资源量约 48 945 万 t。

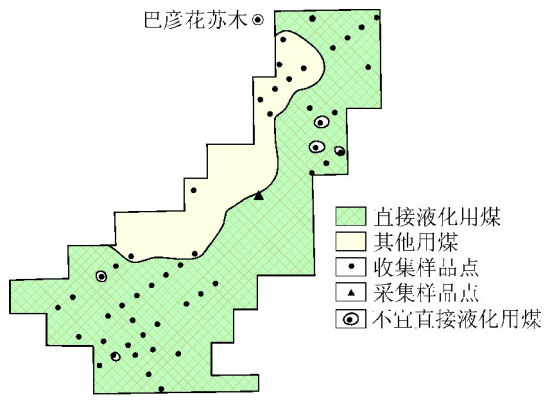


图6 3-1 煤层直接液化有利区

Fig.6 Favorable area of direct liquefaction of No.3-1 coal seam

## 5 结 论

1) 褐煤中惰质组成分难于液化,3-1 煤层煤岩显微组分中惰质组含量较低(2.21%~8.70%),完全符合直接液化原料煤惰质组含量要求范围。

2) 一般而言,低灰分、高挥发分、高 H/C 原子比有利于褐煤直接液化。3-1 煤层精煤灰分大部分小于 10%,挥发分大于 35%,H/C 原子比大部分大于 0.75,符合褐煤直接液化对煤质参数的指标要求。

3) 从 3-1 煤层煤岩显微组分和煤质参数 2 个方面出发,对该煤层直接液化用煤进行了评价,其可作为较理想的直接液化原料煤,圈定有利区面积约 35.33 km<sup>2</sup>,资源量约 48 945 万 t。

### 参考文献(References):

- [1] 郝玉良,杨建丽,李允梅,等.低阶煤温和液化特征分析[J].燃料化学学报,2012,40(10):1153-1160.  
HAO Yuliang, YANG Jianli, LI Yunmei, *et al.* Study on mild liquefaction of lower rank coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2012, 40(10): 1153-1160.
- [2] 任相坤,房鼎业,金嘉璐,等.煤直接液化技术开发新进展[J].化工进展,2010,29(2):198-203.  
REN Xiangkun, FANG Dingye, JIN Jialu, *et al.* New proceed achieved in the direct coal liquefaction[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(2): 198-203.
- [3] 吴春来,吴克,方铿,等.煤分级高效集成利用体系简介[J].能源新技术,2007,29(1):33-34,46.  
WU Chunlai, WU Ke, FANG Keng, *et al.* Introduction to the system of high efficiency integrated utilization of coal[J]. New Energy Technology, 2007, 29(1): 33-34, 46.
- [4] 颜丙峰.高压釜中煤液化性能评价方法[J].洁净煤技术,2017,23(2):56-59.  
YAN Bingfeng. Calculation methods of direct coal liquefaction using autoclave[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(2): 56-59.
- [5] 梁江朋,李文博,毛学锋,等.新疆艾丁褐煤直接液化反应动力学[J].煤炭学报,2015,40(7):1670-1676.  
LIANG Jiangpeng, LI Wenbo, MAO Xuefeng, *et al.* Kinetics of direct liquefaction of Aiding lignite from Xinjiang[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1670-1676.
- [6] 曲思建.我国低阶煤转化利用的技术进展与发展方向[J].煤质技术,2016(S1):1-4.  
QU Sijian. Latest progress and development direction of low rank coal conversion and utilization in China[J]. Coal Quality Technology, 2016(S1): 1-4.
- [7] 张国昀.低阶煤分质利用的前景展望及建议[J].当代石油化工,2014(9):19-23.  
ZHANG Guoyun. The prospect of low rank coal separate utilization according to quality and suggestions for it[J]. Petroleum & Petro-

chemical Today, 2014(9):19-23.

- [8] AMIN M N, LI Y, RAZZAQ R, *et al.* Pyrolysis of low rank coal by Nickel based Zeolite catalysts in the two-staged bed reactor[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, 118: 54-62.
- [9] 王慧,浑宝炬,夏新茹.低阶煤提质技术的发展现状及趋势[J].河北联合大学学报:自然科学版,2016,38(1):82-87.  
WANG Hui, YUN Baoju, XIA Xinru. Development status and trends of upgrading technology of low-rank coal[J]. Journal of Hebei Polytechnic University: Natural Science Edition, 2016, 38(1): 82-87.
- [10] 朱晓苏.中国煤炭直接液化优选煤种的研究[J].煤化工,1997(3):32-39.  
ZHU Xiaosu. Research on Chinese optimum coal types used in direct liquefaction[J]. Coal Chemical Industry, 1997(3): 32-39.
- [11] 罗星云.云南褐煤直接液化可行性研究[J].煤炭科学技术,2013,41(S1):412-415.  
LUO Xingyun. Feasibility study of brown coal direct liquefaction in Yunnan Province[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(S1): 412-415.
- [12] 舒歌平,史士东,李克健.煤炭液化技术[M].北京:煤炭工业出版社,2003:94-102.
- [13] 张建强,张恒利,杜金龙,等.内蒙古白音华煤田煤中微量元素分布特征[J].煤炭学报,2016,41(2):310-315.  
ZHANG Jianqiang, ZHANG Hengli, DU Jinlong, *et al.* Distribution characteristics of trace elements in coal of Inner Mongolia Baiyinhua Coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 310-315.
- [14] 苗全芸,漆家福,肖阳,等.二连盆地乌尼特拗陷伸展构造特征及成盆演化[J].中国地质,2016,43(6):2036-2045.  
MIAO Quanyun, QI Jiafu, XIAO Yang, *et al.* Extensional structures and basin evolution of the Wunite depression in Erlian Basin[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2036-2045.
- [15] 夏筱红,秦勇,王文峰,等.煤炭直接液化技术中煤基本特性研究进展[J].中国矿业,2007,16(5):87-89.  
XIA Xiaohong, QIN Yong, WANG Wenfeng, *et al.* Advances on study of essential coal characteristics from direct liquefaction[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(5): 87-89.
- [16] 李小彦,降文萍,武彩英.陕北煤田侏罗纪煤直接液化问题探讨[J].煤炭科学技术,2005,33(4):59-62.  
LI Xiaoyan, JIANG Wenping, WU Caiying. Discussion on direction liquefaction with Jurassic coal from Shanbei coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(4): 59-62.
- [17] PARKASH S, CARSON D, IGNASIAK B. Petrographic composition and liquefaction behavior of North Dakota and Texas lignites[J]. Fuel, 1983, 62(6): 627-631.
- [18] 李永伦,高山松,李克健.惰质组含量对上湾煤液化性能的影响[J].洁净煤技术,2013,19(4):50-54.  
LI Yonglun, GAO Shansong, LI Kejian. Influence of inertinite content on liquefaction performance of Shangwan coal[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(4): 50-54.
- [19] 蒋立翔.煤质对煤液化效果的影响分析[J].煤质技术,

(下转第 108 页)

- [5] 王维忠,刘东,许江,等.瓦斯抽采过程中钻孔位置对煤层参数演化影响的试验研究[J].煤炭学报,2016,41(2):414-423.  
WANG Weizhong, LIU Dong, XU Jiang, *et al.* Experimental study on the influence of drainage borehole position on dynamic parameters of coal seam in CBM recovery process[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 414-423.
- [6] 许江,刘龙荣,刘东,等.煤层瓦斯抽采过程中煤岩变形的物理模拟试验[J].煤炭学报,2015,40(3):562-570.  
XU Jiang, LIU Longrong, LIU Dong, *et al.* Physical simulation of coal and rock deformation in the process of coal seam gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 562-570.
- [7] 马耕,苏现波,魏庆喜.基于瓦斯流态的抽采半径确定方法[J].煤炭学报,2009,34(4):501-504.  
MA Geng, SU Xianbo, Wei Qingxi. The determination method of coal gas drainage radius based on methane flow state[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 501-504.
- [8] 梁冰,袁欣鹏,孙维吉.本煤层顺层瓦斯抽采渗流耦合模型及应用[J].中国矿业大学学报,2014,43(2):208-213.  
LIANG Bing, YUAN Xinpeng, SUN Weiji. Seepage coupling model of in-seam gas extraction and its applications[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(2): 208-213.
- [9] 杨天鸿,陈仕阔,朱万成,等.煤层瓦斯卸压抽采动态过程的气-固耦合模型研究[J].岩土力学,2010,31(7):2247-2252.  
YANG Tianhong, CHEN Shikuo, ZHU Wancheng, *et al.* Coupled model of gas-solid in coal seams based on dynamic process of pressure relief and gas drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2247-2252.
- [10] 王宏图,江记,王再清,等.本煤层单一顺层瓦斯抽采钻孔的渗流场数值模拟[J].重庆大学学报,2011,34(4):24-29.  
WANG Hongtu, JIANG Jiji, WANG Zaiqing, *et al.* Numerical simulation of seepage field of gas extraction drilling of single bedding of mining-coal bed[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(4): 24-29.
- [11] 司鹄,郭涛,李晓红.钻孔抽采瓦斯流固耦合分析及数值模拟[J].重庆大学学报,2011,34(11):105-110.  
SI Hu, GUO Tao, LI Xiaohong. Analysis and numerical simulation of fluid-structure coupling of gas drainage from boreholes[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(11): 105-110.
- [12] MC LENNAN J D, SCHAFFER P S, PRATT T J. A guide to determining coalbed gas content[M]. Chicago: US Gas Research Institute, 1995.
- [13] 李志强,刘勇,许彦鹏,等.煤粒多尺度孔隙中瓦斯扩散机理及动扩散系数新模型[J].煤炭学报,2016,41(3):633-643.  
LI Zhiqiang, LIU Yong, XU Yanpeng, *et al.* Influence of temperature on dynamic diffusion coefficient of CH<sub>4</sub> into coal particles by new diffusion model[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 633-643.
- [14] ERGUN S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
- [15] SHENG DC, SLOAN SW, GENS A. Constitutive model for unsaturated soils: Thermomechanical and algorithmic aspects. Computational Mechanics, 2004, 33: 453-465.
- [16] 蒋斌松,张强,贺永年,等.深部圆形巷道破裂围岩的弹塑性分析[J].岩石力学与工程学报,2007,26(5):982-986.  
JIANG Binsong, ZHANG Qiang, HE Yongnian, *et al.* Elastoplastic analysis of cracked surrounding rocks in deep circular openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 982-986.
- [17] JF ZOU, SS LI, Y XU, *et al.* Theoretical solutions for a circular opening in an elastoplastic rock mass incorporating the out-of-plane stress and seepage force[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2016, 20(2): 687-701.
- [18] 刘恺德.高应力下含瓦斯原煤三轴压缩力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):380-393.  
LIU Kaide. Mechanical properties of raw coal containing gas under high triaxial stress compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 380-393.
- [19] PC Carman. Slip flow in granular beds[J]. Nature, 1947, 160(4061): 301-302.
- [20] 刘恺德,刘泉声,朱元广,等.考虑层理方向效应煤岩巴西劈裂及单轴压缩试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):308-316.  
LIU Kaide, LIU Quansheng, ZHU Yuanguang, *et al.* Experimental study of coal considering directivity effect of bedding plane under Brazilian splitting and uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 308-316.
- [21] 秦云虎,王彦君,胡荣华,等.直接液化用煤指标体系分级探讨及应用评价[J].中国煤炭地质,2017,29(9):7-10.  
QIN Yunhu, WANG Yanjun, HU Ronghua, *et al.* Discussion on index system classification of coal for direct liquefaction and application assessment[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(9): 7-10.
- [22] 贺永德.现代煤化工技术手册[M].北京:化学工业出版社,2010:1025-1030.
- [23] 谢崇禹.煤液化用煤种的选择研究[J].当代化工,2007,36(1):65-66.  
XIE Chongyu. The select of coal for hydrogenation fluidized coal[J]. Contemporary Chemical Industry, 2007, 36(1): 65-66.
- [24] 凌开成,邹纲明.兖州烟煤与石油渣油共处理的研究[J].煤炭转化,1997,20(2):62-66.  
LING Kaicheng, ZOU Gangming. A study on coprocessing Yanzhou coal with petroleum residua[J]. Coal Conversion, 1997, 20(2): 62-66.

(上接第223页)

2008(5):46-49.

JIANG Lixiang. Analysis on the effect of coal quality on coal liquefaction[J]. Coal Quality Technology, 2008(5): 46-49.

- [20] 秦云虎,王彦君,胡荣华,等.直接液化用煤指标体系分级探讨及应用评价[J].中国煤炭地质,2017,29(9):7-10.

QIN Yunhu, WANG Yanjun, HU Ronghua, *et al.* Discussion on index system classification of coal for direct liquefaction and application assessment[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(9): 7-10.

- [21] 司胜利,李小彦,田新娟,等.我国西部低煤级煤的液化性能[J].煤田地质与勘探,2009,37(3):10-14.

SI Shengli, LI Xiaoyan, TIAN Xinjuan, *et al.* Liquefaction property

of low rank coal in west China[J]. Coal Geology & Exploration, 2009, 37(3): 10-14.

- [22] 贺永德.现代煤化工技术手册[M].北京:化学工业出版社,2010:1025-1030.

- [23] 谢崇禹.煤液化用煤种的选择研究[J].当代化工,2007,36(1):65-66.

XIE Chongyu. The select of coal for hydrogenation fluidized coal[J]. Contemporary Chemical Industry, 2007, 36(1): 65-66.

- [24] 凌开成,邹纲明.兖州烟煤与石油渣油共处理的研究[J].煤炭转化,1997,20(2):62-66.

LING Kaicheng, ZOU Gangming. A study on coprocessing Yanzhou coal with petroleum residua[J]. Coal Conversion, 1997, 20(2): 62-66.