2019年 7月

Clean Coal Technology

# 新疆东疆褐煤直接加氢液化特性

# 赵 鹏<sup>1,2,3,4</sup>

(1.煤炭科学技术研究院有限公司煤化工分院,北京 100013;2.煤炭资源高效开采和洁净利用国家重点实验室,北京 100013; 3.国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013;4.煤基节能环保碳材料北京市重点实验室,北京 100013)

要:为实现新疆东疆煤的清洁高效利用,对新疆东疆褐煤进行煤质与组成分析,以新疆东疆褐煤 摘 与加氢溶剂为原料,在500 mL 搅拌式高压釜中进行加氢液化的过程调控试验,考察了反应温度、反应 压力和停留时间对氢耗率、气产率、转化率、油产率、沥青质产率的影响规律,探究了不同工艺参数对 液化性能及各类产物分布的内在作用机制,进行了0.01 t/d 连续试验的验证,并深入解析了液化初级 油品的结构组成特征。结果表明,新疆东疆褐煤液化活性组分高达 90%,具有高挥发分和高 H/C 原 子比的煤质特征,在反应温度430℃,反应压力15 MPa 和60 min 的缓和反应条件下,煤的转化率高 达94%,油产率57%,依然呈现出与传统反应条件(反应温度450℃,反应压力17 MPa,反应时间60 min)相当的反应性能和液化效果,是一种适宜直接加氢液化的优质原料,反应条件的缓和使反应器 温控更加平稳,有利于降低大型液化设备的能耗。过程调控表明,反应温度升至430℃,有效促进了 煤和沥青质向油和气的转化,导致转化率和油产率增加:高氢压有利于氢气在液化体系中的溶解,有 利于稳定自由基碎片,增强了沥青质中稠环芳烃加氢向小分子的转化;30 min 新疆东疆褐煤已呈现出 良好的液化效果和反应性能,时间延长至90 min,铁系催化剂的活性相 Fe,Sg 在加氢液化反应过程中 逐渐转变为 FeoSu,甚至是 FeS 等非活性态,催化能力明显降低,引发了沥青质的缩聚反应,导致沥青 质产率升高,转化率和油产率下降。0.01 t/d 新疆东疆褐煤连续试验获得的直接加氢液化初级油保 留了煤的一些结构组成特征,具有高密度、高芳烃、高氮低硫的特点,<220 ℃馏分油 20 ℃密度为 851.2 kg/m<sup>3</sup>,220~350 ℃馏分油 20 ℃ 密度为 953.5 kg/m<sup>-3</sup>,2 种馏分初级油的主要组成为单环芳 烃,均为60%左右,这是由多环芳烃易加氢生成单环芳烃,而单环芳烃加氢或开环反应较为困难所 致。<220 ℃馏分油氮含量为2500×10<sup>-6</sup>,220~350 ℃馏分油氮含量为4800×10<sup>-6</sup>,均比各自的硫含 量高一个数量级。

关键词:低阶煤;加氢液化;初级油;反应温度;反应压力;停留时间

中图分类号:TQ536 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)04-0040-06

# Direct hydroliquefaction characteristics of lignite in eastern

# area of Xinjiang

ZHAO Peng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Coal Chemistry Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology & Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control,

Beijing 100013, China; 4. Beijing Key Laboratory of Coal Based Carbon Materials, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to find a clean and high efficient technology for economic utilization of Xinjiang coal, the coal quality and composition of lignite in East Xinjiang were analyzed. In Lignite of eastern Xinjiang and hydrogenation solvent as raw materials, hydrogenation regulation test was carried out in 500 mL stirring autoclave to investigate influences of temperature, pressure and residence time on hydrogen con-

收稿日期:2019-05-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19050501

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600303)

作者简介:赵 鹧(1978—),男,辽宁本溪人,副研究员,硕士,研究方向为煤炭直接液化与煤焦油加氢。E-mail:411296849 @ qq. com

引用格式:赵鹏.新疆东疆褐煤直接加氢液化特性[J].洁净煤技术,2019,25(4):40-45.

ZHAO Peng. Direct hydroliquefaction characteristics of lignite in eastern area of Xinjiang [J]. Clean Coal Technology, 2019,25(4):40-45.

#### 赵 鹏:新疆东疆褐煤直接加氢液化特性

sumption, gas, conversion, oil and asphaltene. The effects of process parameters on liquefaction performance and distribution of various products were investigated. A verification test was finished in 0.01 t/d BSU and the structural characteristics of liquefied primary oil products were analyzed in depth. The results show that the active component is 90% in the lignite of eastern Xinjiang with the characteristics of high volatile and H/C atom ratio. Under the moderate conditions (430 °C ,15 MPa and 60 min), the conversion of coal is up to 94% and the oil yield is 57%, which is similar to that under the traditional conditions (450 °C, 17 MPa and 60 min). The lignite is a high quality raw material for direct liquefaction. Moderate conditions contribute much to smooth temperature control of reactor, which is conducive to reducing energy consumption of large equipment. Process regulation test shows that the conversion of coal and asphaltene to oil and gas is promoted effectively, resulting in the increase of coal conversion and oil yield by increasing temperature especially at 430 °C. High hydrogen pressure is conducive to the dissolution of H<sub>2</sub> in reaction system, the stability of radical fragment and the hydrogenation of polycyclic aromatic hydrocarbons in asphaltene to small molecules. The lignite is possessed of favorable liquefaction effect and reaction performance at 30 min. Due to the phase transform of iron based catalyst in reaction system from active Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>to nonactive Fe<sub>9</sub>S<sub>10</sub> and FeS at 90 min, the catalytic ability decreases significantly, which leads to the condensation reaction of asphaltene, the increase of asphaltene yield and the decrease of coal conversion and oil yield. Retaining some structural characteristics of coal, the primary oil from hydrogenation liquefaction continuous test of the lignite in eastern area of Xinjiang has the characteristics of high density, high aromatic hydrocarbon, high nitrogen and low sulphur. The 20 °C density of <220 °C fraction is 851.2 kg/m<sup>3</sup>. The 20 °C density of 220-350 °C fraction is 953.5 kg/m<sup>3</sup>. The main structure in the primary oil of <220 °C and 220-350 °C fraction is mononuclear aromatics (60%) caused by the easy hydrogenation of polycyclic aromatic hydrocarbon and the difficult ring opening reaction of mononuclear aromatics. Nitrogen content in <220 °C fraction is 2 500×10<sup>-6</sup> and 4 800×10<sup>-6</sup> in 220-350 °C fraction, which is one order higher than sulphur content respectively.

Key words: low rank coal; hydroliquefaction; primary oil; reaction temperature; reaction pressure; residence time

## 0 引 言

新疆是我国重要的能源战略基地,预测煤炭 资源总量 2.19 万亿 t. 占全国煤炭资源总量的 40%,居全国煤炭蕴藏量之首<sup>[1]</sup>。其中东疆地区 蕴藏的褐煤资源极其丰富,地质储量高达100亿 t,非常适合大型机械化开采<sup>[2]</sup>。东疆褐煤为高挥 发分、高热值和低硫磷煤<sup>[3]</sup>,是国内适宜直接加氢 液化的优良煤种,而直接加氢液化技术是我国实 现能源替代、保障能源安全和优化能源结构的重 要技术。近十年,煤炭直接加氢液化技术有了突 飞猛进的发展,基础理论研究领域,煤科院对我国 煤炭进行全面的液化性能评价[4-6],确定了适宜直 接加氢液化煤种的煤质特点及必要条件;神华集 团和华东理工大学[7-9] 深入研究了反应条件对液 化性能的影响规律,提出了工艺参数与煤种匹配 性的研究方法;日本将合成铁系纳米催化剂[10-12] 用于煤直接液化,深入探究了催化机理并提出了 合成方法。工程技术领域[13-15],我国神华集团建 成世界上首套煤直接液化百万吨级商业示范装 置,实现了安稳长满优的运转,标志着我国已经掌握了煤直接液化关键技术<sup>[16-17]</sup>。传统的神华煤直 接液化工艺采用苛刻的反应条件实现最大程度的 转化。

与神华煤煤质结构截然不同,新疆东疆褐煤更 年轻,具有高活性组分的煤质特征,煤质特性的差异 势必导致液化性能的不同。本文基于新疆东疆煤的 煤质特征,研究了新疆东疆褐煤的液化反应特性,揭 示了过程调控对液化效果的影响规律,进行了连续 试验验证,分析液化初级油的结构组成特征,为工艺 放大提供基础数据。

#### 1 试 验

#### 1.1 煤样

以新疆东疆褐煤和加氢溶剂为原料,一种含铁 矿物为催化剂,硫磺为助催化剂进行加氢液化试验。 煤样制备参照 GB 474—2008《煤样的制备方法》,对 煤样破碎、缩分并研磨至 0.15 mm 以下,在 100 ℃、 真空条件下干燥,经过上述制备的煤样置于干燥器 中低温避光保存,煤质分析见表 1。

表1 新疆东疆褐煤煤质分析

Table 1Analysis of lignite quality in eastern	Xinjiang
---	----------

元素分析/%					工业分	分析/%		岩相分析/%	
$\mathbf{C}_{\mathrm{daf}}$	$\mathbf{H}_{\mathrm{daf}}$	$\mathbf{N}_{\mathrm{daf}}$	$\mathbf{S}_{\mathrm{daf}}$	$O_{daf}$	$A_{\rm d}$	$V_{\rm daf}$	镜质组	惰质组	壳质组
73. 53	4. 91	0. 91	0.55	20.10	6.70	49.43	86. 92	10. 30	2.78

洁净煤技术

由表1可知,新疆东疆褐煤具有较高的挥发分和 H/C 原子比,氧含量高达 20.10%,活性组分(镜质组和壳质组之和)接近 90%,是加氢液化的良好原料。

#### 1.2 供氢溶剂

溶剂为炼油厂重油催化裂化回炼油萃取重 芳烃经多次加氢后的富含芳烃的溶剂油,分析结 果见表2。溶剂的密度为969.2 kg/m<sup>3</sup>(20 ℃), H/C 原子比为1.48,350 ℃以下馏分约为30%, 350~450 ℃ 馏分占 70%, 是较好的煤加氢液化的供氢溶剂。

#### 1.3 试验过程

加氢液化反应试验在 500 mL 搅拌式高压釜中 进行,东疆褐煤与循环溶剂配制浓度 45% 的煤浆后 与催化剂混合均匀,置入高压釜中,高压釜气密合格 后,氮气吹扫 3 次,再用氢气吹扫 3 次,最后充氢气 至指定压力,以 4 ℃/min 升温至反应温度后恒定, 反应完毕降至室温。

表 2 加氢溶剂分析 Table 2 Analysis of hydrogenated solvent

元素分析/% 密					密度/(kg・m <sup>-3</sup> )			馏程分析/℃		
С	Н	Ν	S	H/C	(20 °C)	IBP	10%	30%	50%	95%
87.58	10. 68	0. 22	0.04	1.48	969. 2	209	303	347	368	447

气袋收集釜内气体进行色谱分析,釜内液固相 产物搅匀取样5g,依次用正己烷和四氢呋喃进行索 式萃取分析。

高压釜试验过程的氢耗率、气产率、沥青质产率、水产率、油产率、转化率计算方法参照 GB/T 33690—2017《煤炭液化反应性的高压釜试验方法》。

## 2 试验结果与分析

#### 2.1 东疆褐煤加氢液化高压釜试验

#### 2.1.1 温度的影响

氢初压 6.5 MPa(反应压力 15 MPa)、反应时间 60 min、铁系催化剂添加量 1% 的条件下,考察了温度对东疆褐煤液化过程的影响,结果如图 1 所示。

由图1(a)可知,430 ℃、氢初压 6.5 MPa(反应 压力 15 MPa)、停留时间 60 min 的转化率高达 94%,油产率为 57%,说明东疆褐煤是一种非常适 宜直接加氢液化的良好煤种。反应温度低于 430 ℃ 时,煤的转化率和油产率随温度的升高提高明显,其 中 380 ℃时的转化率为 64%,430 ℃时的转化率达 到 94%,温度进一步升高转化率变化不大,油产率 也呈现相似规律,只是温度高于 430 ℃时油产率有 所降低。

由图1(b)可知,反应温度达到430 ℃,中间产物沥青质类产率骤降了70%,进一步提高反应温度,沥青类物质产率降幅减缓。反应温度升高导致 气产率明显增加,氢耗稳步提高。

东疆煤直接加氢液化过程,温度低于430℃时, 提高反应温度,促进了煤和沥青质向油和气体小分



图1 温度对加氢液化效果的影响

Fig. 1 Effect of temperature on hydroliquefaction

子产物转化,导致转化率和油产率明显增加;温度高 于430℃时,煤和沥青质中难转化组分随温度升高 变化不大,气产率随温度升高不断增加,导致油收率 呈现下降态势。

2.1.2 氢初压的影响

430 ℃、停留时间 60 min、铁系催化剂添加量 1%的条件下,考察了氢初压对东疆褐煤液化过程的 影响,结果如图 2 所示。

由图2可知,在考察的压力范围内,新疆东疆褐 煤加氢液化转化率随氢初压的升高变化不明显,油 产率随氢初压升高缓慢增加,氢耗和气产率随氢初



图2 氢初压对加氢液化效果的影响

Fig. 2 Effect of initial hydrogen pressure on hydroliquefaction

压增加变化不大,中间产物沥青质产率在氢初压大 于 6.5 MPa 时降幅显著。高氢压有利于氢气在煤 液化溶剂中的溶解,有利于提高液化体系向自由基 的供氢性能,增强了沥青质这类大分子稠环芳烃加 氢向小分子的转化,大大减少沥青质缩聚结焦的反 应。但高氢压在加氢液化过程中也增加了能耗,因 此,新疆东疆褐煤加氢液化反应较为适宜的氢初压 为 6.5 MPa(反应压力 15 MPa)。

2.1.3 停留时间的影响

430 ℃、氢初压 6.5 MPa、铁系催化剂添加量 1%的条件下,考察了停留时间对东疆褐煤液化过程 的影响,结果如图 3 所示。

由图3可知,30 min 停留时间,东疆褐煤的转化 率已达到93%,油产率55%,停留时间延长,转化率 和油产率变化不显著,气产率和氢耗随反应时间的 延长缓慢增加;沥青质产率从0~30 min 下降了 33%,60 min 又降低了36%,停留时间进一步延长 至90 min,沥青质产率略有增加。

东疆褐煤加氢液化结果表明,30 min 停留时间 已呈现出良好的液化效果和反应性能,随着停留时 间延长至60 min,有利于沥青质向油和气转化,停留 时间进一步延长至90min,铁系催化剂的活性相 Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>逐渐转变为 Fe<sub>9</sub>S<sub>10</sub>,甚至是 FeS<sup>[18]</sup>,此时体系 中催化剂的催化能力明显降低,引发了沥青质的缩 聚反应,重质组分缩合附着在催化剂表面,导致沥青 质产率升高。



图3 停留时间对加氢液化效果的影响

Fig. 3 Effect of residence time on hydroliquefaction

#### 2.2 东疆褐煤加氢液化小型连续试验

2.2.1 试验装置和工艺

新疆东疆褐煤加氢液化连续运转试验在 0.01 t/d 连续装置上进行,煤加氢液化工艺流程如图 4 所 示。



图4 0.01 t/d 连续运转工艺流程

Fig. 4 0.01 t/d flow sheet of continuous operation process

煤经破碎和干燥预处理制成一定粒度的煤粉, 与已制备好的供氢溶剂配制成浓度45%的油煤浆, 经高压输送泵与氢气混合预热后依次进入2个反应 器进行煤加氢液化反应。反应物料经过高温分离器 和低温分离器分离出的气体大部分循环使用,排出 气体经计量和组成分析。低分油进行常减压蒸馏获 得<220℃馏分油和220~350℃馏分油,高分油进 行减压蒸馏获得 VGO 和残渣。根据煤浆配制使用 的溶剂量,本次试验的液化初级油为低分油常减压 蒸馏获得全部<220℃馏分油和部分220~350℃馏 分油。

对煤液化单元的物料衡算可取得煤液化转化

率、气体产率、水产率、蒸馏油收率和氢耗量。 2.2.2 连续试验验证

选用的原料与高压釜相同,铁系催化剂添加量 为1%(Fe/干煤,质量比),连续试验工艺参数为反 应温度为430℃,反应压力为15 MPa,表观停留时 间为1h,并与传统试验(反应温度450℃,反应压 力17 MPa,表观停留时间1h)的反应效果进行比 较,加氢液化物料平衡见表3,试验结果见表4。

表3 新疆东疆褐煤连续试验物料平衡

Table 3	BSU	material	balance	of	lignite	in	eastern	area
---------	-----	----------	---------	----	---------	----	---------	------

	kg			
	项目	连续试验	传统试验	
	干燥无灰基煤	9.33	9.35	
	溶剂	12.22	12.25	
煤浆	灰及催化剂	0.91	0.91	
	水	0.15	0.15	
小计		22.61	22.66	
氢气		0.49	0. 51	
人方合计		23.10	23.17	
气体		1.63	1.82	
水		1.62	1.67	
<220 ℃馏分油		2.18	2.21	
220~350℃馏分油		3.0	2.90	
溶剂		12.22	12.25	
	油	0. 47	0. 43	
	沥青质	0. 52	0. 47	
残渣	未反应的煤	0. 55	0. 51	
	灰及催化剂	0.91	0.91	
	小计	2.45	2. 32	
	出方合计	23.10	23. 17	

#### 表 4 新疆东疆褐煤连续试验结果 Table 4 BSU results of lignite in eastern area of Xinjiang

项目	连续试验	传统试验
转化率/%	94.10	94. 54
<220 ℃馏分油	23.37	23.64
蒸馏油收率/% 220~350℃馏分油	32.15	31.00
小计	55. 52	54.64
油产率/%	60.56	59.23
水产率/%	15.76	16.26
气产率/%	17.47	19.47
沥青质产率/%	5.57	5.03
氢耗/%	5.25	5.45

注:转化率、收率、产率、氢耗等均为干燥无灰基。

由表4可知,新疆东疆褐煤转化率94%,油产 率60%,高压釜试验结果在连续装置上得到了很好 验证,新疆东疆褐煤具有良好反应性能和液化效果, 这是由于新疆东疆褐煤中液化活性组分高达90%, 是直接加氢液化优异的煤种。反应温度430℃、反 应压力15 MPa 和停留时间60 min 较为缓和的条件 下,新疆东疆褐煤的转化率、油产率及其他产物分布 与传统反应温度450℃、反应压力17 MPa 和停留时 间60 min 相比差别不大。较为缓和的条件下,气产 率明显降低,有利于液化油的生成,较高的油收率将 为今后煤液化工程项目带来较好的收益。另外,反 应温度和压力的缓和可使反应器温控更加平稳,进 一步降低大型液化设备的能耗。

2.2.3 加氢液化初级油性质

煤经加氢液化产生的、未经任何精制加工的液 化油称为加氢液化初级油。新疆东疆褐煤煤液化初 级油的性质见表5。

衣 新疆朱瑄衒保保攸化例级油的性质	表 5	長5 新疆东疆褐煤煤液化初级油的性质
-------------------	-----	--------------------

Table 5 Properties of the primary oil from direct liquefaction of the lignite in eastern area of Xinjiang

项目	密度/	元素分析/%					结构组成/%		
	$({\rm kg}{f \cdot}{\rm m}^{-3})(20{}^\circ\!\!{\rm C})$	С	Н	Ν	S	0	饱和烃	一环芳烃	二环芳烃
<220 ℃馏分油	851.2	83. 22	12.36	0.25	0.04	4. 13	27.36	62.63	10. 01
220~350℃馏分油	953. 5	87.54	10.76	0.48	0.02	1.20	12.25	58.66	29.09

由表 5 可知,小于 220 ℃ 初级油密度高达 851.2 kg/m<sup>3</sup>,H含量为 12.36%,H/C 原子比 1.78, 220~350 ℃ 初级油密度高达 953.5 kg/m<sup>3</sup>,H含量 为 10.76%,H/C 原子比为 1.47;氮比硫含量高一个 数量级,这是由于直接液化过程中,加氢脱氮比脱硫 更难;由于酚类化合物富集在小于 220 ℃初级油馏 分中,因此,该馏分氧含量是 220~350 ℃馏分的 4 倍。2 个液化初油馏分结构以一环芳烃为主,这是 44 由于直接液化过程中,多环芳烃易加氢生成二环,甚 至单环芳烃,而单环芳烃发生进一步加氢或开环反 应较为困难。

### 3 结 论

1)新疆东疆褐煤具有挥发分高和 H/C 原子比高的煤质特征,液化活性组分高达 90%,在反应温度 430 ℃、反应压力 15 MPa 和 60 min 的反应条件

下,煤的转化率可达94%,油产率57%,是适宜直接 液化的优良煤种。

2)新疆东疆褐煤加氢液化的最佳反应条件为: 反应温度 430 ℃,反应压力 15 MPa,与传统条件(反 应温度 450 ℃,反应压力 17 MPa)下的反应性能和 液化效果相当,反应温度和压力的缓和,有利于反应 器温控更加平稳,降低大型液化设备的能耗。

3) 新疆东疆褐煤加氢液化初级油保留了煤的 结构组成特点, < 220 ℃ 馏分油 20 ℃ 密度为 851.2 kg/m<sup>3</sup>, 220 ~ 350 ℃ 馏分油 20 ℃ 密度为 953.5 kg/m<sup>3</sup>。2 种馏分初级油一环芳烃均为 60% 左右, <220 ℃ 馏分油氮含量为 2 500×10<sup>-6</sup>, 220 ~ 350 ℃馏分油氮含量为 4 800×10<sup>-6</sup>, 均比各自硫含 量高一个数量级。根据需要采取不同的加工工艺可 获得不同用途的成品油。

#### 参考文献(References):

- [1] 李虎威,赵红超,牙生·吾甫尔,等.新疆煤炭资源科学开采发展趋势与前景分析[J].煤炭工程,2017,49(6):20-25.
   LI Huwei,ZHAO Hongchao,YASHENG · Wufuer, et al. Analysis on development trend and prospects of scientific mining for coal resources in Xinjiang[J]. Coal Engineering,2017,49(6):20-25.
- [2] 张希. 褐煤的用途及其加工利用方向分析[J]. 中国西部科技, 2009,8(16):20-21.
   ZHANG Xi. Lignite application and analysis of lignite processing

and utilizing directions [J]. Science and Technology of West China,2009,8(16):20-21.

- [3] 朱川,曲思建,张景,等. 准东煤层中钠的分布与浸出行为[J]. 煤炭学报,2016,41(6):1554-1559.
  ZHU Chuan, QU Sijian, ZHANG Jing, et al. Distribution and leaching behavior of sodium in Zhundong coal seam [J]. Journal of China Coal Society,2016,41(6):1554-1559.
- [4] 朱晓苏.中国煤炭直接液化优选煤种的研究[J].煤化工, 1997,25(3):32-39.
   ZHU Xiaosu. research on Chinese optimum coal types used in di-

rect lique faction [ J ]. Coal Chemical Industry, 1997, 25 ( 3 ) : 32 – 39.

- [5] 郭万喜,刘兵元,李苹.不同煤种配煤直接液化试验研究[J]. 煤化工,2004,32(2):10-15.
  GUO Wanxi, LIU Bingyuan, LI Ping. Tests and studies on direct liquefaction of blended coals[J]. Coal Chemical Industry,2004,32 (2):10-15.
- [6] 朱继升,杨建丽,刘振宇,等四种有应用前景的煤的液化性能 评价[J].煤炭转化,2000,23(2):47-52.
  ZHU Jisheng, YANG Jianli, LIU Zhenyu, et al. Evaluation of four kinds of promising Chinese coals for liquefaction [J]. Coal Conversion,2000,23(2):47-52.
- [7] 张德祥,刘瑞民,高晋生.煤炭直接加氢液化技术开发的几点 思考[J].石油学报(石油加工),2011,27(3):329-335.
   ZHANG Dexiang,LIU Ruimin,GAO Jinsheng. Thoughts about the

development of coal direct hydro-liquefaction technology [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2011, 27 (3): 329–335.

- [8] 杜海胜,安亮,韩来喜,等. 影响神华煤直接液化性能的因素及 分析[J].煤炭转化,2012,35(3):33-37.
  DU Haisheng, AN Liang, HAN Laixi, et al. Analysis of the factors in affecting the performance of Shenhua direct coal liquefaction [J]. Coal Conversion,2012,35(3):33-37.
- [9] 高山松,张德祥,李克健,等. 神华煤直接液化循环溶剂的催化 加氢[J].石油学报(石油加工),2014,30(4):644-649.
   GAO Shansong,ZHANG Dexiang,LI Kejian, et al. Catalytic hydrotreating of recycle solvent for Shenhua coal liquefaction[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2014, 30(4): 644-649.
- [10] HIRANO K, KOUZU M, OKADA T, et al. Catalytic activity of iron compounds for coal liquefaction [J]. Fuel, 1999, 78 (15): 1867-1873.
- TAKAO Kaneko, SATORU Sugita, MASAAKI Tamura, et al. Highly active limonite catalysts for direct coal liquefaction [J]. Fuel,2002,81(11):1541-1549.
- LI Y, MA F, SU X, et al. Ultra-large-scale synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and their application for direct coal liquefaction
   [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53 (16):6718-6722.
- [13] 刘振宇. 煤直接液化技术发展的化学脉络及化学工程挑战
  [J]. 化工进展,2010,29(2):193-197.
  LIU Zhenyu. Principal chemistry and chemical engineering challenges in direct coal liquefaction technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2010,29(2):193-197.
- [14] 张玉卓. 神华现代煤制油化工工程建设与运营实践[J]. 煤炭 学报,2011,36(2):179-184.
   ZHANG Yuzhuo. Construction and operation of Shenhua's mod-

ern coal-to-liquid-and-chemicals demonstration projects [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2):179–184.

- [15] 吴秀章,舒歌平,李克健,等.煤炭直接液化工艺与工程[M]. 北京:科学出版社,2015:120-135.
- [16] 舒歌平.神华煤直接液化工艺开发历程及其意义[J].神华科技,2009,7(1):78-82.
   SHU Geping. Development history and its significance of Shenhua coal direct liquefaction[J]. Shenhua Science and Technolo-
- gy,2009,7(1):78-82.
  [17] 李克健,程时富,蔺华林,等.神华煤直接液化技术研发进展
  [J].洁净煤技术,2015,21(1):50-55.
  LI Kejian, CHENG Shifu, LIN Hualin, et al. Study and development of Shenhua direct coal liquefaction technology [J]. Clean Coal Technology,2015,21(1):50-55.
- [18] 赵鹏,李军芳,吴艳,等.复杂多相体系煤加氢液化反应与氢 传递的研究[J].燃料化学学报,2018,46(12):1423-1429.
   ZHAO Peng,LI Junfang,WU Yan, et al. Study on reaction behavior and hydrogen transfer in complex multi-phase system during hydro-liquefaction[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2018,46(12):1423-1429.