

# 煤焦油轻质油加氢制清洁燃料油试验研究

胡发亭

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院,北京 100013;2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013)

**摘要:**我国石油短缺,对数量可观的煤焦油进行加氢生产燃料油和精细化学品具有重要意义。以煤焦油预处理后的3种轻质馏分油混合油为原料,在固定床加氢装置上进行了轻质油全馏分加氢提质试验研究,考察了反应温度、反应压力、空速和氢油比对原料油脱硫脱氮及芳烃加氢饱和的影响。最后对加氢提质产物油性质进行分析。结果表明,产物氮、硫及芳烃含量均随着反应温度、压力、氢油比的增大而减少,随着空速的增大而增大;在反应温度为360℃,反应压力为16 MPa,液体体积空速为0.25 h<sup>-1</sup>,氢油比为1 800的最优工艺条件下,液体收率达到98.03%。对加氢后全馏分油进行精密蒸馏切割得到<170℃的石脑油馏分和>170℃的柴油馏分;石脑油馏分20℃密度为776.9 kg/m<sup>3</sup>,几乎不含硫、氮,芳烃潜含量67.6%,可以作为优质的催化重整原料;加氢后的柴油馏分不含硫、氮,芳烃含量低,闪点高,凝点低,馏程适宜,可以作为柴油的调和油。

**关键词:**中低温煤焦油;加氢提质;石脑油馏分;柴油馏分;芳烃加氢饱和

中图分类号:TQ529.1

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2018)02-0096-06

## Experimental study on the hydrogenation of coal tar light oil to clean fuel

HU Fating

(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)

**Abstract:** Because of the shortage of petroleum in China, it has great significance to produce fuel oil and fine chemicals from the hydrogenation of considerable amount of coal tar. Three kinds of mixed oil from light distilled oil were used as raw feedstocks to carry out the hydro-refining experiment in a fixed bed hydro-refining unit. The influence of reaction pressure and temperature, liquid volume space velocity, hydrogen/oil ratio on the produced oil properties were investigated. The results indicate that the nitrogen content, sulfur content and aromatic content of products decrease with the increase of reaction temperature, pressure and hydrogen/oil ratio, but increase significantly with the rising of liquid volume space velocity. Under the optimum condition of the reaction temperature at 360℃, reaction pressure at 16 MPa, liquid volume space velocity at 0.25 h<sup>-1</sup> and the ratio of hydrogen/oil at 1 800, the yield of the produced oil is up to 98.03%. The produced oil is distilled to obtain naphtha <170℃ and diesel oil >170℃. The naphtha fraction has a density of 776.9 kg/m<sup>3</sup> at 20℃, no sulfur and nitrogen are detected, and the latent content of aromatics is 67.6%. It can be used as a high quality catalytic reforming raw materials. Diesel fuel has low aromatics content, without sulfur nitrogen, high flash point, low condensation point and is suitable for distillation, thus it can be used as a blend of diesel oil.

**Key words:** mid-low temperature coal tar; hydro-refining; naphtha; diesel oil; aromatics hydrogenation saturation

## 0 引言

我国是富煤缺油的国家,随着我国大型煤化工

产业的发展,煤焦油产量逐年增加,因此对煤焦油的加工利用受到国家的重视<sup>[1-2]</sup>。煤焦油是煤炭在热解、气化或干燥提质等加工利用过程中的副产品,是

收稿日期:2017-12-21;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2018.02.018

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600303)

作者简介:胡发亭(1976—),男,山东菏泽人,高级工程师,研究方向为煤炭直接液化、煤油共炼、煤焦油加氢等。E-mail:hufating@163.com

引用格式:胡发亭.煤焦油轻质油加氢制清洁燃料油试验研究[J].洁净煤技术,2018,24(2):96-101.

HU Fating. Experimental study on the hydrogenation of coal tar light oil to clean fuel[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2): 96-101.

具有刺激性气味、黑色或黑褐色的黏稠状液体,煤焦油轻质油馏分芳烃含量较少,脂肪烃和环烷烃较多,适合加氢提质制取汽油、柴油等动力燃料和化学品<sup>[3-4]</sup>。对煤焦油进行加氢生产清洁燃料油品,既可以高效利用煤基油品资源,又能有效补充石油资源的不足,具有重要的现实意义和战略意义<sup>[5]</sup>。

目前,对不同种类的全馏分煤焦油及其轻质馏分油的加氢改质研究较多,但对于煤焦油轻质油和加氢裂化产物油混合馏分油的加氢提质研究较少。燕京等<sup>[6]</sup>对干馏高温煤焦油进行加氢研究,得到辛烷值 68.4 的汽油组分和十六烷值 39.1 的柴油调和组分。李冬等<sup>[7-8]</sup>对中低温煤焦油进行加氢改质研究,汽柴油重整原料和催化裂化或加氢裂化尾油原料,通过单因素试验、Box-Behnken 试验设计优化工艺条件。石振晶等<sup>[9]</sup>对多联产低温煤焦油全馏分油加氢精制进行研究,考察了反应条件对产物油密度、硫含量和氮含量的影响,确定了最佳工艺参数。范建锋等<sup>[10]</sup>对中温煤焦油 500 °C 以下馏分进行加氢改质研究,通过工艺优化,石脑油馏分和柴油馏分比例分别达到 23.17% 和 72.41%,且硫、氮含量很低。本文利用高活性的煤基油品加氢提质催化剂对中低温煤焦油预处理后的混合轻质馏分油进行加氢提质试验,着重考察了反应压力、温度等条件对加氢效果的影响,为加氢提质工艺优化和工程设计,以及为提高煤基油品利用率和产物油质量提供基础数据和理论指导。

## 1 试 验

### 1.1 试验原料

原料油为取自陕西榆林地区某兰炭厂副产的中低温煤焦油,煤焦油全馏分中的重质油馏分的密度、黏度、沥青质、残炭较高,直接固定床加氢容易造成催化剂床层堵塞,因此对中低温煤焦油原料进行了预处理。

采用 GB/T 2288—2008《焦化产品水分测定方法》对煤焦油原料进行了水分测定<sup>[11]</sup>,结果为 1.56%。由于煤焦油中水分容易造成加氢提质催化剂失活,因此采用间歇式脱水试验装置对煤焦油样品进行了脱水预处理。

采用实沸点常压蒸馏和减压蒸馏试验装置,对脱水后的中低温煤焦油全馏分进行了馏分蒸馏切割分离试验,分离出<230 °C 的酚油馏分、230~310 °C 馏分和>310 °C 的重油馏分<sup>[12-13]</sup>。对酚油馏分进行溶剂萃取脱除酚类化合物<sup>[14]</sup>,对大于 310 °C 的重质油在悬浮床加氢装置上进行加氢裂化处理,得到了加氢裂化轻质产物油。

将悬浮床加氢裂化<370 °C 的轻质产物油、<230 °C 脱酚后馏分油、230~310 °C 馏分油 3 种馏分混合,其混合比例按照预处理前的全馏分相应馏分比例进行混配,分别为 63.15%、10.03%、26.82%,以这 3 种馏分油的混合物作为加氢提质进料油,其性质见表 1。

表 1 煤焦油轻质混合油的基本性质

Table 1 Properties of light oil from coal tar

密度(20 °C)/ (kg·m <sup>-3</sup> )	黏度(60 °C)/ (mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	酸度/ mg	残炭含 量/%	氮含 量/%	元素分析/%				
					C	H	O	N	S
985.17	4.26	28.79	0.18	2.00	84.88	9.14	4.88	0.87	0.23
馏程/°C			族组成/%		金属含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				
IBP/20%/40%/60%	70%/80%/90%/EBP		烷烃	环烷烃	芳烃	Fe	Ni	Cu	V
77/225/263/295	302/331/358/375		12.72	27.50	59.78	0.80	0.10	0.10	0.10

注:酸度为 100 mL 溶液中 KOH 的质量;元素分析为无水基,下同。

由表 1 可知,煤焦油轻质油密度大,硫、氮等杂原子含量高,芳烃含量高,需要经过加氢精制才能获得清洁燃料油。

### 1.2 催化剂和硫化剂

采用已商业化运用于煤基油加工的石油系加氢提质催化剂,该催化剂已经成功应用于神华集团煤

液化示范装置液化粗油的提质加工,取得良好的脱硫脱氮和芳烃饱和性能。催化剂采用挤条成型制备技术,催化剂的物性参数见表 2。

采用的催化剂属于 W-Mo-Ni 型加氢提质催化剂,主要成分是 W、Mo、Ni,载体为  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,具有强度高,活性金属(W、Mo、Ni)含量高,比表面积

大的特点,适用于煤焦油轻质油的物性特点和结构特征。

对催化剂进行湿法硫化,硫化剂为二甲基二硫醚(DMDS),其理化性质见表3。

表2 加氢提质催化剂性质  
Table 2 Property of catalysts

项目	性质	项目	性质
形状	条状蝶型	金属活性组分	W-Mo-Ni
孔容/( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	0.31~0.45	WO <sub>3</sub> 含量/%	≥26.0
比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	≥142	MoO <sub>3</sub> 含量/%	≥2.5
压碎强度/( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	≥19	NiO含量/%	≥2.7
堆密度/( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	0.93~0.98		

表3 二甲基二硫醚理化性质

Table 3 Physicochemical properties of dimethyl disulfide

项目	数值	项目	数值
密度(20℃)/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 057	熔点/℃	-84.7
沸点/℃	117	分解温度/℃	200
蒸汽压(25℃)/kPa	3.8	含硫量/%	68
闪点/℃	24.4		

### 1.3 加氢装置和产物油分析方法

试验在100 mL小型固定床连续加氢装置上进行,该装置各压力、流量、温度、质量等数据都采用精密仪表测量,装置工艺流程如图1所示。

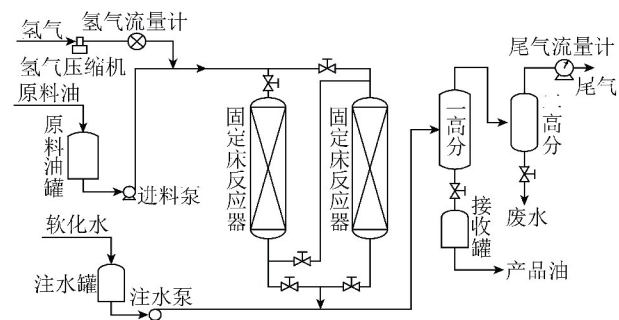


图1 煤焦油轻质油加氢试验工艺流程

Fig. 1 Process of hydrogenation of light oil from coal tar

加氢产物油馏分切割和馏程分析在间歇式精密蒸馏装置上进行,分离精度高(20块理论塔板),数据重现性好,执行标准为ASTM D86—2015《石油产品和液体燃料常压蒸馏的标准试验方法》<sup>[15]</sup>。加氢产品油的硫氮含量采用微量氮硫分析仪进行测定,硫含量按GB/T 17040—2008《石油和石油产品硫含量的测定》测定,氮含量按NB/SH/T 0704—2010《石油和石油产品中氮含量的测定》测定<sup>[16-17]</sup>,族组

成按SH/T 0606—2005《中间馏分烃类组成测定法(质谱法)》测定等<sup>[18-19]</sup>。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 工艺条件对加氢效果的影响

#### 2.1.1 反应压力的影响

在反应温度340℃、体积空速 $1 \text{ h}^{-1}$ 、氢油比800(V/V)的条件下,考察了反应压力对煤焦油轻质油加氢脱硫脱氮及芳烃加氢饱和的影响,结果如图2所示。

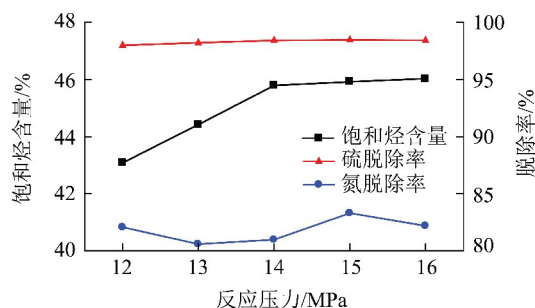


图2 反应压力对原料油加氢效果的影响

Fig. 2 Effect of reaction pressure on the hydrogenation of raw oil

由图2可知,压力对原料油的脱硫脱氮效果影响不大,原料油的硫脱除率比较高,氮脱除率不高。对加氢产品油族组成进行分析,随着压力增大,饱和烃含量呈增加趋势,但随着压力增加,增幅变缓,反应压力的影响变小。

#### 2.1.2 反应温度的影响

在反应压力12 MPa、体积空速 $1 \text{ h}^{-1}$ 、氢油比800的条件下,考察了反应温度对煤焦油轻质油脱硫脱氮及芳烃加氢饱和的影响,试验结果如图3所示。对340、350、360℃的馏分油进行族组成分析,结果见表4。

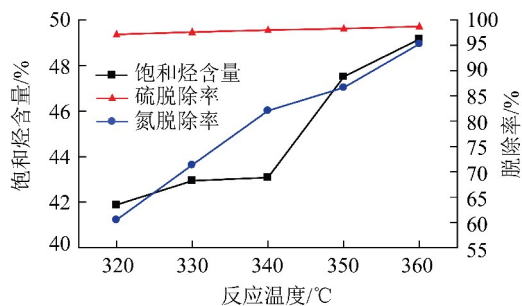


图3 反应温度对原料油加氢效果的影响

Fig. 3 Effect of reaction temperature on the hydrogenation of raw oil

表4 温度对加氢芳烃饱和的影响

Table 4 Effect of temperature on saturation of hydrogenated aromatics

温度/℃	芳烃含量/%			饱和烃含量/%
	一环	二环	总芳烃	
340	49.43	7.49	56.92	43.08
350	50.44	2.05	52.49	47.51
360	48.83	2.01	50.84	49.16

由图3可知,320℃时,硫脱除率已经达到97.42%,氮脱除率仅为61.72%,随着温度升高,硫氮脱除率均有所提高,其中氮脱除率提高显著;340℃时,硫脱除率达到98.11%,氮脱除率达到82.12%,温度进一步升高,硫脱除率变化不大,氮脱除率有所提高。由表4可知,与原料油相比,340℃加氢产物中总芳烃含量变化不大,但芳烃组成分布明显改变,一环芳烃含量提高2.4倍,二环芳烃减少一半,不含大于二环的稠环芳烃及极性物。随着反应温度进一步提高,饱和烃含量明显增加,芳烃加氢饱和对温度比较敏感。

### 2.1.3 液体体积空速的影响

在反应温度340℃、反应压力12 MPa、氢油比800的条件下,考察液体体积空速对煤焦油轻质油脱硫脱氮性能及芳烃饱和的影响,如图4所示。

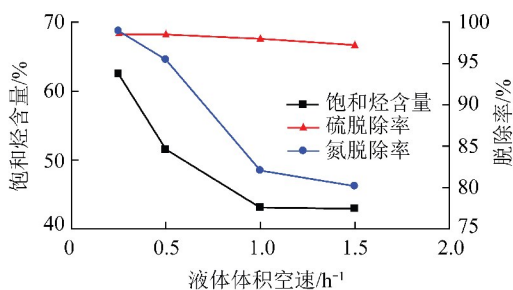


图4 液体体积空速对原料油加氢效果的影响

Fig. 4 Effect of liquid volume space velocity on the hydrogenation of raw oil

由图4可知,液体体积空速对硫脱除率影响不大,对氮脱除率影响明显,液体体积空速从1 h<sup>-1</sup>降至0.5 h<sup>-1</sup>时,氮脱除率提高了12%,空速进一步降至0.25 h<sup>-1</sup>时,氮脱除率提高了4%。液体体积空速对芳烃饱和影响比较显著,空速在1 h<sup>-1</sup>以上时,空速的影响变小。

### 2.1.4 氢油比的影响

在温度340℃、压力12 MPa、空速为0.5 h<sup>-1</sup>的条件下,考察了氢气和原料油体积比对脱硫脱氮和

芳烃加氢饱和的影响,结果如图5所示。

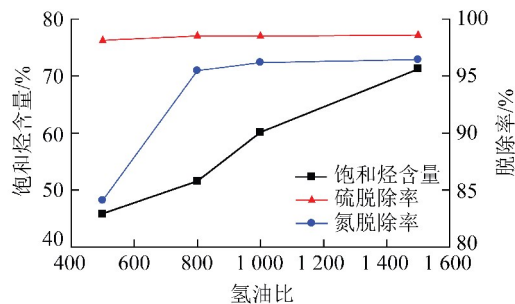


图5 氢油比对原料油加氢效果的影响

Fig. 5 Effect of hydrogen/oil ratio on the hydrogenation of raw oil

由图5可知,氢油比对硫脱除率影响不大,氢油比从500提高到800时,氮脱除率明显增加,提高了12%,氢油比在800以上时,氢油比对氮脱除率影响较小。氢油比对芳烃加氢饱和的影响比较明显,加氢产物油中的饱和烃含量随氢油比的增大而增加,原因是氢油比加大,氢分压增加,与轻质油加氢反应的氢气分子数增加,有利于芳烃的加氢饱和,因此氢油比越大加氢效果越好,根据理论推导和相关文献结论,氢油比在1500~2500时,加氢效果最佳<sup>[10,18]</sup>。

## 2.2 加氢产物油性性质分析

### 2.2.1 加氢产物油全馏分的性质

以硫氮脱除率为考核指标,进行了加氢提质试验,获得的最优加氢提质试验条件为:反应温度为360℃,反应压力为16 MPa,液体体积空速为0.25 h<sup>-1</sup>,氢油比为1800。在此条件下对陕西榆林中低温煤焦油的3种轻质馏分油混合物进行了加氢提质试验,对加氢产物油进行了精密蒸馏和理化性质分析,加氢产物产率见表5。

表5 最佳工艺条件下的产物产率

Table 5 Yield of product under the optimal technological conditions

项目	数值
氢耗/%	4.40
<170℃石脑油馏分产率/%	21.74
>170℃柴油馏分产率/%	76.29
水产率/%	4.92
气产率(C <sub>1</sub> ~C <sub>4</sub> )/%	0.25
H <sub>2</sub> S产率/%	0.22
NH <sub>3</sub> 产率/%	0.97

煤焦油轻质馏分油混合油经过加氢提质后的产物包括油、水和气体(烃类气体、 $H_2S$ 和 $NH_3$ 等)。由表5可知,液体收率达到98.03%,柴油馏分油收率为76.29%,产物油以柴油馏分为主, $C_1 \sim C_4$ 产率为0.25%, $H_2S$ 产率0.22%, $NH_3$ 产率0.97%,水产率为4.92%,氢耗为4.40%。

对加氢产物油的全馏分进行性质分析,结果见表6。可知,煤焦油轻质油馏分油经加氢提质后,加氢产物油全馏分密度下降,20℃密度降至

$857.6 \text{ kg/m}^3$ ,降低了13%;加氢后全馏分油氢含量提高了3.9%,硫和氮含量很低;芳烃含量为13.71%,均为一环芳烃,芳烃饱和率为77%;加氢油品密度减小,与加氢原料油相比,95%馏出温度降低17℃,加氢产物油品性质明显改善。

### 2.2.2 石脑油馏分的性质

对加氢产物油进行精密蒸馏切割,得到了<170℃的石脑油馏分和>170℃的柴油馏分。加氢后的石脑油馏分性质见表7。

表6 煤焦油加氢产物油的全馏分性质

Table 6 Total distillate properties of coal tar hydrogenation upgrading oil

密度(20℃)/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	运动黏度(0℃)/ ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	酸度/ mg	元素分析/%					馏程/℃			族组成/%	
			C	H	O	N	S	IBP/10%/20%/30%/40%/50%	60%/70%/80%/90%/EBP	饱和烃	一环芳烃	
857.60	4.26	—	84.88	9.14	4.88	0.87	0.23	70/140/165/203/225/242	262/280/298/321/359	86.29	13.71	

表7 加氢产物油石脑油馏分性质

Table 7 Properties of naphtha distillation

密度(20℃)/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	硫含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	芳烃潜 含量/%	辛烷值	馏程/℃			族组成/%		
					10%/30%/50%	70%/90%/EBP	链烷烃	环烷烃	芳烃	
776.90	<5	<5	67.6	62.3	104/112/122	135/154/169	10.60	82.48	6.92	

由表7可知,加氢产物油的石脑油馏分密度低;硫和氮含量很低,均<5 mg/kg;芳烃含量和链烷烃含量分别为6.92%和10.60%;产物油中大部分为环烷烃,为82.48%;芳烃潜含量接近70%,不过辛

烷值偏低,比较适合做催化重整的原料油。

### 2.2.3 柴油馏分的性质

中低温煤焦油加氢提质后的柴油馏分性质见表8。

表8 加氢产物油柴油馏分性质

Table 8 Properties of diesel oil distillation

密度(20℃)/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	运动黏度(20℃)/ ( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	硫含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	氮含量/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	凝点/ ℃	十六 烷值	馏程/℃		族组成/%	
						10%/30%/50%	70%/90%/EBP	饱和烃	一环芳烃
883.20	5.72	<5	<5	-9	42.6	225/248/269	295/335/360	85.44	14.56

由表8可知,中低温煤焦油加氢产物油的柴油馏分20℃密度为 $883.2 \text{ kg/m}^3$ ;硫和氮含量很低,均<5 mg/kg;芳烃都是一环芳烃,且含量仅为14.56%。尽管加氢后的柴油馏分具有闪点高、酸度低、凝点低、馏程适宜等特点,由于十六烷值不高,可作为清洁柴油产品的调和油。

含量高、密度大、芳烃含量高的特点,需加氢提质加工才能转化为合格的清洁燃料油产品。压力对于煤焦油轻质油加氢效果不大,空速、温度和氢油比的影响明显,特别是低空速有利于煤焦油轻质油的加氢提质。

2)加氢提质试验表明,在反应温度360℃,反应压力16 MPa,液体体积空速 $0.25 \text{ h}^{-1}$ ,氢油比1800的最佳工艺条件下,加氢后全馏分产物的密度,硫、氮含量降幅明显,加氢全馏分中几乎没有

## 3 结 论

1)煤焦油轻质馏分油混合物具有硫氮杂原子

硫和氮,20℃密度降至 $857.6\text{ kg/m}^3$ ,降低了13%,芳烃饱和率为77%,油品性质明显改善。

3)加氢产物油的石脑油馏分具有适宜的密度,几乎不含硫氮,芳烃潜含量接近70%,具有较好的油品质量,可作为优质的催化重整原料;加氢产物油的柴油馏分硫、氮含量很低,均 $<5\text{ mg/kg}$ ,芳烃含量低,且都是一环芳烃,含量仅为14.56%,闪点高,20℃运动黏度适宜,腐蚀性低,可作为清洁柴油产品的调和油。

#### 参考文献 (References):

- [1] 姚春雷,全辉,张忠清.中低温煤焦油加氢生产清洁燃料油技术[J].化工进展,2013,32(3):501-507.  
YAO Chunlei, QUAN Hui, ZHANG Zhongqing. Hydrogenation of medium and low temperature coal tars for production of clean fuel oil[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(3):501-507.
- [2] 胡发亭,张晓静,李培霖.煤焦油加工技术进展及工业化现状[J].洁净煤技术,2013,19(5):63-67.  
HU Fating, ZHANG Xiaojing, LI Peilin. Development of processing technology and industrialization status of coal tar[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5):31-35.
- [3] 张晓静.中低温煤焦油加氢技术[J].煤炭学报,2011,36(5):840-844.  
ZHANG Xiaojing. Hydrogenating process for coal tar from mid-low-temperature coal carbonization[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(5):840-844.
- [4] 刘芳,王琳,杨卫兰,等.中低温煤焦油深加工技术及市场前景分析[J].现代化工,2012,32(7):7-11.  
LIU Fang, WANG Lin, YANG Weilan, et al. Study on deep-processing technology of medium and low temperature coal tar and analysis of its market prospect[J]. Modern Chemical Industry, 2012, 32(7):7-11.
- [5] 赵璞,裴贤丰,王之正.中低温煤焦油加工利用现状研究[J].煤质技术,2016,11(6):11-15.  
ZHAO Pu, PEI Xianfeng, WANG Zhizheng. Study on the present situation of medium and low temperature coal tar processing and utilization[J]. Coal Quality Technology, 2016, 11(6):11-15.
- [6] 燕京,吕才山,刘爱华,等.高温煤焦油加氢制取汽油和柴油[J].石油化工,2006,35(1):33-36.  
YAN Jing, LYU Caishan, LIU Aihua, et al. Production of gasoline and diesel oil hydrogenation of high temperature coal tar[J]. Petrochemical Technology, 2006, 35(1):33-36.
- [7] 李冬,李稳宏,高新,等.中低温煤焦油加氢改质工艺研究[J].煤炭转化,2009,32(4):81-84.  
LI Dong, LI Wenhong, GAO Xin, et al. Hydro-upgrading process of medium and low temperature coal tar[J]. Coal Conversion, 2009, 32(4):81-84.
- [8] 李冬,李稳宏,高新,等.煤焦油加氢脱硫工艺研究[J].西北大学学报,2010,40(3):447-450.  
LI Dong, LI Wenhong, GAO Xin, et al. A study on hydrodesulfurization process of coal tar[J]. Journal of Northwest University, 2010, 40(3):447-450.
- [9] 石振晶,方梦祥,唐巍,等.多联产煤焦油加氢制取汽柴油试验研究[J].煤炭学报,2014,39(S1):219-224.  
SHI Zhenjing, FANG Mengxiang, TANG Wei, et al. Hydrofining of wide range distillate derived from multi-generation coal tar[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1):219-224.
- [10] 范建锋,张忠清,姚春雷,等.中温煤焦油加氢生产清洁燃料油试验研究[J].煤炭学报,2013,38(10):1868-1872.  
FAN Jianfeng, ZHANG Zhongqing, YAO Chunlei, et al. Study on the hydrogenation of medium temperature coal tar to clean fuel[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10):1868-1872.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.焦化产品水分测定方法:GB/T 2288—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [12] American Society Testing and Materials. Standard test method for distillation of crude petroleum (15-theoretical plate column): ASTM D2892-03a[S]. West Conshohocken: [s. n.], 2002.
- [13] American Society Testing and Materials. Standard test method for distillation of heavy hydrocarbon mixtures (vacuum potstill method): ASTM D5236—2013[S]. West Conshohocken: [s. n.], 2017.
- [14] 赵渊,毛学锋,李培霖,等.丙三醇水溶液提取煤焦油中酚类化合物试验研究[J].洁净煤技术,2014,20(4):55-57.  
ZHAO Yuan, MAO Xuefeng, LI Peilin, et al. Preliminary exploration of extracting phenolic compounds in medium and low temperature coal tar by glycerin solution[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(4):55-57.
- [15] American Society Testing and Materials. Standard test method for atmospheric distillation of petroleum and liquid fuels: ASDM D86—17[S]. West Conshohocken: [s. n.], 2017.
- [16] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会.石油和石油产品硫含量的测定 能量色散X射线荧光光谱法:GB/T 17040—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [17] 国家能源局.石油和石油产品中氮含量的测定 舟进样化学发光法:NB/SH/T 0704—2010[S].北京:中国石化出版社,2010.
- [18] 李猛,吴昊,高晓冬,等.煤焦油加氢生产清洁燃料油技术的开发[J].石油炼制与化工,2015,46(6):1-6.  
LI Meng, WU Hao, GAO Xiaodong, et al. Development of hydro upgrading technology for producing clean transportation fuel from coal tar[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2015, 46(6):1-6.
- [19] 中国石油化工集团公司.石油产品运动黏度测定法和动力黏度计算法:GB/T 265—1988[S].北京:中国标准出版社,1988.