

催化裂化油浆用作煤油共炼溶剂的流变性研究

王学云^{1,2,3}, 张晓静^{1,2,3}, 陈亚飞^{1,2,3}, 毛学锋^{1,2,3}, 颜丙峰^{1,2,3}

(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 10013;
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)

摘要:为解决油煤浆输送过程中的沉积和阻力过大等问题,在常压低温条件下,分析了溶剂性质、煤颗粒粒度、催化剂和助催化剂、溶胀、剪切速率、煤浆浓度、配制时间和温度等条件对油煤浆黏度的影响规律。结果表明,在相同条件下,油煤浆黏度随溶剂黏度的增大而增大,随煤颗粒粒度的增加而减小,随催化剂和助催化剂的添加而增加,随煤浆浓度升高而增加。当油煤浆的浓度大于30%时,表观黏度随剪切速率的增大而降低,表现出剪切稀化。煤颗粒在溶剂中溶胀后,使得煤颗粒在煤浆中的体积浓度增大,黏度变大。温度对油煤浆黏度影响较大,黏度随温度的升高而降低,在常压低温条件下,黏度随温度变化呈现一定的定量关系。

关键词:煤油共炼;油煤浆;表观黏度;流变性

中图分类号:TQ529

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2016)02-0064-05

Rheological properties of FCC slurry using as coal-oil co-processing solvent

WANG Xueyun^{1,2,3}, ZHANG Xiaojing^{1,2,3}, CHEN Yafei^{1,2,3}, MAO Xuefeng^{1,2,3}, YAN Bingfeng^{1,2,3}

(1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China;

3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to prevent settling and lower resistance in the process of coal-oil slurry conveying, under atmospheric pressure and low temperature, many different influencing factors of coal-oil slurry viscosity were studied, including solvent properties, coal particle size, swelling, shear rate and concentration of coal-oil slurry, preparation time, temperature and so on. The experimental results showed that, the viscosity of coal-oil slurry increased by increasing solvent viscosity and coal-oil slurry concentration, adding catalyst and cocatalyst. The viscosity of coal-oil slurry decreased by increasing coal particle size. When the coal-oil slurry concentration was greater than 30%, the viscosity of coal-oil slurry decreased with the increase of shear rate. The volume concentration of coal-oil slurry increased after swelling in solvent, which led to the increase of coal-oil slurry viscosity. The temperature had a great influence on coal-oil slurry viscosity, and it decreased with the increase of temperature. The relationship between coal-oil slurry viscosity and temperature presented certain quantitative relationship under atmospheric pressure and low temperature.

Key words: coal-oil co-processing; coal-oil slurry; apparent viscosity; rheological properties

0 引 言

煤油共炼是将煤和重质油一起通过反应器,同时加氢裂解成轻、中质油和少量烃类气体的工艺技术。煤油共炼的实质是用重质原油、石油渣油、油砂沥青或煤焦油等重质油代替煤液化过程中使用的溶

剂油,是利用煤炭资源高效生产液体燃料的方法^[1]。煤油共炼技术的基础是煤炭直接液化,与重油加氢裂化技术具有相近的反应条件^[2]。煤油共炼过程中,首先原料煤要与重质油以一定比例配制成油煤浆,经过高压煤浆泵增压,流经换热器和预热炉升至规定温度,再进入加氢反应器发生液化反应。

收稿日期:2015-10-12;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2016.02.014

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAA04B04)

作者简介:王学云(1990—),男,山东临沂人,硕士研究生,从事煤直接液化、煤油共炼等方面的工作。E-mail:wangxueyun189@gmail.com

引用格式:王学云,张晓静,陈亚飞,等.催化裂化油浆用作煤油共炼溶剂的流变性研究[J].洁净煤技术,2016,22(2):64-68,107.

WANG Xueyun, ZHANG Xiaojing, CHEN Yafei, et al. Rheological properties of FCC slurry using as coal-oil co-processing solvent[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(2): 64-68, 107.

油煤浆输送过程中,重质油与煤发生相互作用,导致包括黏度在内的流变性发生明显变化,可能会造成系统阻力增加。因此必须要考虑煤浆配制浓度,其受限于高压泵输送煤浆允许的黏度范围。油煤浆浓度过高,会造成黏度过大,在管道内流动的阻力增大,功耗增加,煤浆泵无法正常工作;油煤浆浓度过稀,煤颗粒容易在煤浆输送管道内沉降,在高压泵的止逆阀和输送管道内沉积,造成煤浆泵故障,阻塞管道^[3]。针对这个问题,国外早期就做过相关研究^[4-10],国内研究者也十分重视。韩文煜等^[11]主要研究了煤直接液化过程中温度对油煤浆黏度的影响,在200℃前,油煤浆黏度总体呈先降后增的趋势。高晋生等^[12]研究了温度、煤阶、催化剂、剪切速率对油煤浆黏度的影响,并提出预测黏度变化的模型。王永刚等^[13]研究了不同溶剂、温度以及颗粒粒度分布、孔结构等对油煤浆黏度的影响。林泉等^[14]研究油煤浆表观黏度的测量方法。煤油共炼过程中,煤浆黏度在0~500 mPa·s时,高压煤浆泵才能

正常工作^[15]。二战前德国 IGOR (Integrated Gross Oil Refining) 工艺发现,煤浆浓度为50%~53%时,由于强烈的膨胀使得传热系数降低80%,输送管道出现阻塞;而煤浆浓度为40%~42%时,煤浆的传热系数下降较少。故该工艺不得不制备2种浓度煤浆,可见煤浆黏度变化对于工程工艺极为重要^[3]。笔者主要研究了常压低温条件下,溶剂性质、煤颗粒粒度、催化剂和助催化剂、溶胀、剪切速率、煤浆浓度、配制时间和温度等因素对油煤浆黏度的影响规律,以期解决煤浆在输送过程中沉积和阻力过大等问题,并进一步掌握反应过程的流变性。

1 实验部分

1.1 实验原料

实验用原料煤为新疆长焰煤,参照 GB 474—2008《煤样的制备方法》,制得0.154、0.074 mm以下煤样,常温、避光保存于干燥器中。煤样工业分析和元素分析见表1。

表1 煤样工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of coal

工业分析/%					元素分析/%				H/C 原子比
M_{ad}	A_d	V_{daf}	FC_{daf}	$w(C_{daf})$	$w(H_{daf})$	$w(O_{daf})$	$w(N_{daf})$	$w(S_{daf})$	
10.34	6.05	49.55	50.45	76.71	5.44	15.81	1.64	0.40	0.85

实验所用溶剂有2种,一种为石化炼油厂的催化裂化油浆;另一种为典型的高温煤焦油。催化剂为煤炭科学技术研究院有限公司煤化工分院自主开发的煤油共炼催化剂,助催化剂为硫磺。

1.2 实验仪器

黏度测量装置采用德国 HAAKE 公司生产的 VT-550 旋转黏度仪,温度控制装置采用 HAAKE 的恒温油浴。

仪器 VT-550 黏度仪与恒温油浴主要参数如下:

黏度/(mPa·s)	0~5 000
剪切速率/ s^{-1}	0~1 000
剪切力/Pa	0~300
黏度测量精度/(mPa·s)	±10
油浴温度/℃	0~95
油浴温度控制精度/℃	±0.01

2 结果与讨论

2.1 溶剂性质对油煤浆黏度的影响

实验分别采用催化裂化油浆和高温煤焦油作为

配制油煤浆的溶剂,并在不同温度下测定2种溶剂的黏度,具体如图1所示。由图1可知,相同温度下,催化裂化油浆的黏度大于高温煤焦油。

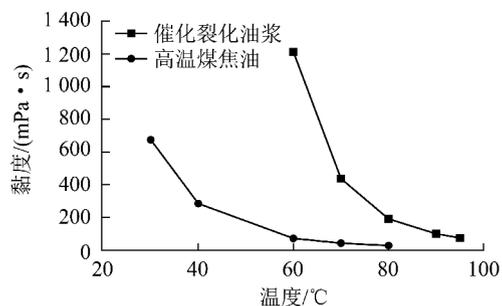


图1 不同溶剂在不同温度下的黏度

Fig. 1 The viscosity of different solvents in different temperatures

将一定煤粉分别加入2种溶剂配制成煤浆浓度为30%、35%、40%的油煤浆,并在不同温度下测定3种煤浆浓度,2种煤浆体系的黏度如图2所示。由图2可知,随着煤浆浓度的增加,煤浆体系浓度增大。由于2种溶剂性质不同,以2种纯溶剂配制的

油煤浆的黏度相差较大,但在相同温度和煤浆浓度条件下,催化裂化油浆体系的黏度大于高温煤焦油

体系。测试温度较低时,溶剂性质对油煤浆体系黏度变化的影响较大。

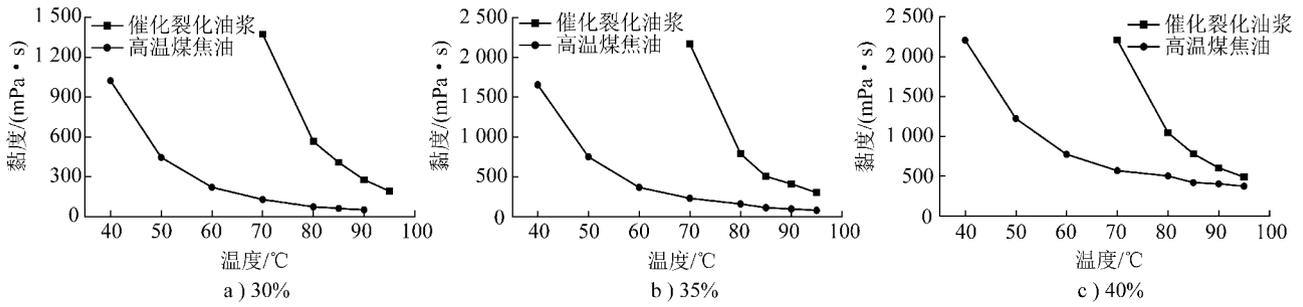


图2 不同浓度的油煤浆黏度

Fig. 2 The viscosity of coal-oil slurry in different concentration

2.2 煤颗粒粒度对油煤浆黏度的影响

以催化裂化油浆为溶剂,煤颗粒分别为 < 0.154、<0.074 mm,利用 MSTERISIZER-X 激光粒度分析仪测定煤样的粒径分布,结果见表2。不同粒度对煤浆黏度的影响如图3所示。

表2 不同颗粒煤样的粒度分布

Table 2 Particle size distribution of different samples

粒径/mm	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{[4.3]}/\mu\text{m}$
<0.154	92.516	102.115
<0.074	45.563	51.361

注: d_{50} 为中位径,即累积含量达50%时对应的颗粒直径; $d_{[4.3]}$ 为体积平均粒径。

由图3可知,配制煤浆浓度为30%时,在同一剪切速率条件下,2种粒度煤浆体系的黏度相差近50 mPa·s;煤浆浓度为40%时,黏度相差近100 mPa·s,油煤浆体系的黏度随煤颗粒粒度的减小而增加。煤浆浓度相同时,<0.154 mm煤颗粒中粗颗粒较多,溶剂空间较大,颗粒在催化裂化油浆中的分散性下降,颗粒间的分子作用力较小,使得油煤浆表观黏度下降,流动性变好,但颗粒过大易发生沉降,使油煤浆体系的稳定性变差;<0.074 mm煤颗粒中细颗粒较多,溶剂空间较小,颗粒在催化裂化油浆中的分散性增强,颗粒间的分子作用力相应增大,使得油煤浆表观黏度升高,流动性变差,但油煤浆体系稳定性提高。因此,要制备流动性好且浓度高的油煤浆,需不同粒径间的煤粉相互级配^[16]。

2.3 催化剂及助催化剂对油煤浆黏度的影响

煤浆浓度为35%时,以催化裂化油浆为溶剂,分别添加1%、3%的催化剂,研究催化剂用量对油煤浆黏度的影响,如图4所示。

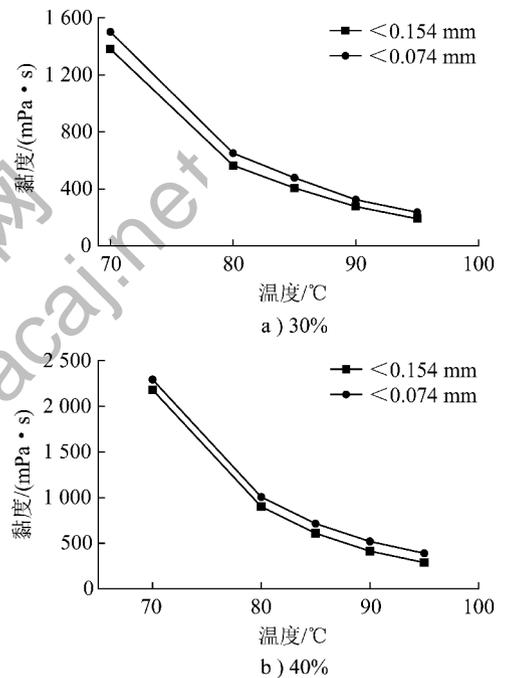


图3 不同粒度对油煤浆黏度的影响

Fig. 3 The influence of different particle size on coal-oil slurry viscosity

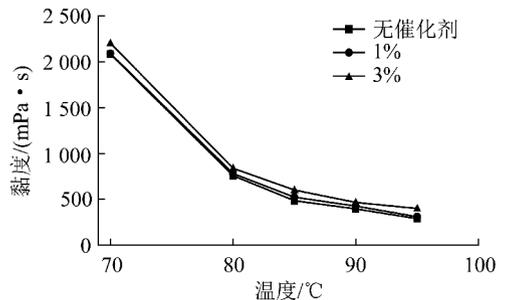


图4 催化剂用量对油煤浆黏度的影响

Fig. 4 The influence of catalyst dosage on coal-oil slurry viscosity

由图4可知,与无催化剂体系的表观黏度相比,添加催化剂的煤浆体系黏度增加约30和90

mPa·s,加入催化剂和助催化剂后增大了体系中固相颗粒浓度,使得煤浆体系表观黏度增大,而非催化裂化油浆本身对煤浆体系产生催化效果。

2.4 剪切速率对油煤浆黏度的影响

当煤颗粒粒度为 $<0.154\text{ mm}$,温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,以催化裂化油浆为溶剂,测定了煤浆浓度分别为0%、30%、35%、40%体系的表观黏度,具体如图5所示。由图5可知,煤浆浓度为35%和40%时,油煤浆体系的表观黏度随剪切速率的增大而降低,表现出很好的剪切稀化行为。当煤浆浓度大于35%时,煤浆体系表现为假塑性流体;煤浆浓度为30%时,体系黏度随剪切速率变化十分平缓,接近牛顿流体。

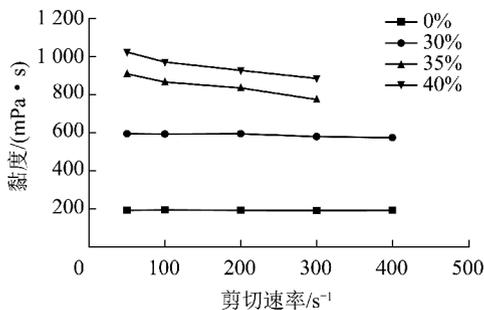


图5 80 °C时煤浆浓度对煤浆黏度的影响

Fig. 5 The influence of coal slurry concentration on coal-oil slurry viscosity at $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.5 溶胀对油煤浆黏度的影响

溶胀现象会引起煤浆表观黏度增大,因此实验考察了溶胀对油煤浆体系表观黏度的影响。当煤颗粒粒度为 $<0.154\text{ mm}$,温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$,煤浆浓度为35%时,添加3%的催化剂,以催化裂化油浆为溶剂,测定不同时间下煤浆表观黏度,如图6所示。

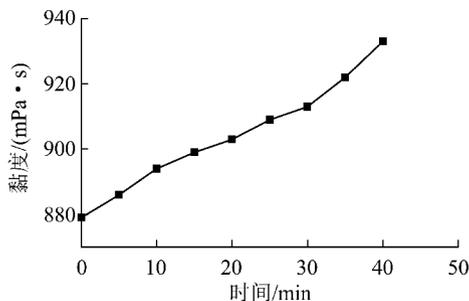


图6 80 °C时溶胀作用对煤浆黏度的影响

Fig. 6 The influence of the swelling on coal-oil slurry viscosity at $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

由图6可知,煤在催化裂化油浆中溶胀作用后,体系黏度增大,这主要是由于溶剂对煤的溶胀作用使得煤颗粒粒径增大,提高固体颗粒的体积浓度,从而引起体系表观黏度增加。

2.6 煤浆浓度对油煤浆黏度的影响

当煤颗粒粒度为 $<0.154\text{ mm}$,温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,以催化裂化油浆为溶剂,测定了煤浆浓度分别为0%、30%、35%、40%体系的表观黏度,如图7所示。由图5和图7可知,随着煤浆浓度的增大,煤浆的表观黏度增大。与图5相比,图7剪切稀化现象不明显,反而出现随剪切速率提高,黏度增加的现象,这主要是由于在图5条件下,非牛顿流体的性质占主导,溶胀作用不明显,而在图7条件下,由于温度升高,溶胀作用明显增强,使得溶胀作用占主导,黏度增加,由此可见,在常压低温条件下,煤浆黏度是溶胀作用和剪切稀化共同作用的结果。

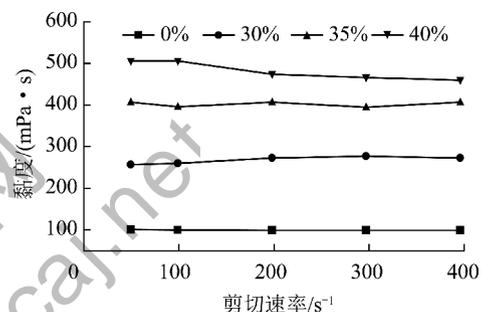


图7 90 °C时煤浆浓度对煤浆黏度影响

Fig. 7 The influence of coal slurry concentration on coal-oil slurry viscosity at $90\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.7 配浆时间对油煤浆黏度的影响

以催化裂化油浆为溶剂配制浓度35%的煤浆体系,并加入2%催化剂,分别在室温下0.5、24、48、96 h后,测定煤浆体系表观黏度,如图8所示。由图8可知,在较低温度下,配制时间对煤浆黏度变化较大,随着温度的升高影响越来越小,在 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度近似。在静止48 h后,煤浆相对稳定,黏度略有差距。

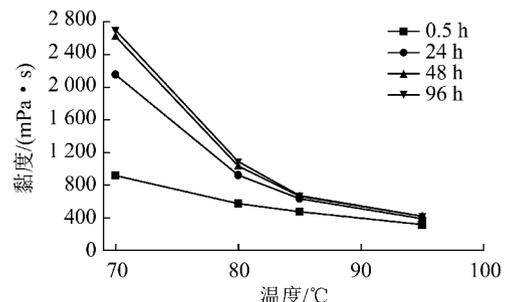


图8 配浆时间对煤浆黏度的影响

Fig. 8 The influence of preparation times on coal-oil slurry viscosity

2.8 温度对油煤浆黏度的影响

以催化裂化油浆为溶剂分别配制了浓度为

30%、35%、40%的煤浆体系,在不同温度下测定其黏度,具体如图9所示。由图2可知,温度对煤浆黏度的影响很大,温度升高时黏度降低,有一定相关关

系。一般液体的黏度与温度关系可近似用 Arrhenius 关系式 $Z=A \cdot \exp[\Delta EZ/(RT)]$ 表示,对上式两边取对数,则有

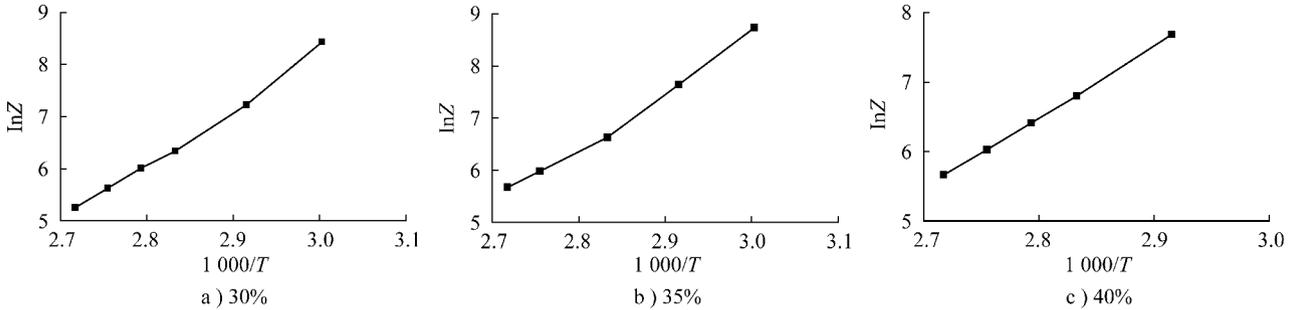


图9 不同煤浆浓度下温度对黏度的影响

Fig. 9 The influence of temperature on coal-oil slurry viscosity in different concentration

$$\ln Z = \ln A + \Delta EZ/RT$$

式中, Z 是反应的速率常数; A 是指前因子; R 是气体常数; ΔEZ 是黏度对温度敏感程度的一种量度; T 是绝对温标下的温度, $K^{[16]}$ 。

对图9进行线性回归,回归方程分别为

$$y = 10.96x - 24.604 \quad R^2 = 0.9928$$

$$y = 10.754x - 23.659 \quad R^2 = 0.9913$$

$$y = 10.218x - 22.122 \quad R^2 = 0.9995$$

式中, $y = \ln Z$; $x = 1000/T$; R^2 为相关系数。

上式线性相关系数接近1,近似线性关系。由此可知,在常压低温条件下,煤浆黏度随温度增加而降低,黏度的对数与温度的倒数呈线性关系。

3 结 论

1)在相同温度和煤浆浓度条件下,催化裂化油浆体系的黏度大于高温煤焦油体系。测试温度较低时,溶剂性质对油煤浆体系黏度变化的影响较大。

2)煤浆黏度随着煤颗粒粒度的增大而减少,添加催化剂和助催化剂后增大了体系中固相颗粒浓度,使得煤浆体系表观黏度增大。随着煤浆浓度的增大,煤浆表观黏度增大。

3)煤浆浓度为35%和40%时,油煤浆体系的表观黏度随剪切速率的增大而降低,表现出很好的剪切稀化行为。当煤浆浓度大于35%时,煤浆体系表现为假塑性流体;煤浆浓度为30%时,体系黏度随剪切速率变化十分平缓,接近于牛顿流体。温度较低时,剪切稀化占主导,溶胀作用不明显,由于温度提高,溶胀作用明显增强,使得溶胀作用占主导,在常压低温条件下,煤浆黏度是溶胀作用和剪切稀化共同作用的结果。

4)在较低温度下,配制时间对煤浆黏度变化较大,随着温度的升高,配制时间的影响越来越小,95℃时黏度近似;静止48h之后,煤浆相对稳定,黏度略有差距。

5)温度对煤浆黏度的影响很大,温度升高时黏度降低。在常压低温下,煤浆浓度为30%、35%、40%时,煤浆体系黏度随温度变化的定量关系式分别为: $y = 10.96x - 24.604$, $y = 10.754x - 23.659$, $y = 10.218x - 22.122$ (其中: $y = \ln Z$; $x = 1000/T$)。

参考文献:

- [1] 李大尚. 煤制油工艺技术分析与评价[J]. 煤化工, 2003, 23(1): 17-23.
Li Dashang. Analysis and evaluation on technology of oil making from coal[J]. Coal Chemical Industry, 2003, 23(1): 17-23.
- [2] 朱豫飞. 煤油共炼技术的现状与发展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(4): 68-72.
Zhu Yufei. Actuality and development of coal and oil co-processing technologies[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(4): 68-72.
- [3] 史士东. 煤加氢液化工程学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 112-113.
Shi Shidong. The engineering foundation of coal hydrogenation liquefaction[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 112-113.
- [4] Cohen A, Richon D. Rheological properties of coal powder + Solvent + Nitrogen to 653 K for two different coals[J]. Fuel, 1986, 65(1): 117-121.
- [5] Dincer H, Boylu F, Sirkeci A A, et al. The effect of chemicals on the viscosity and stability of coal water slurries[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 70(1/2/3/4): 41-51.
- [6] Sakaki T, Shibata M, Hirose H. Effect of coal rank on rheological behavior of coal-solvent slurries during heating[J]. Energy & Fuels, 1995, 9(2): 314-318.

(下转第107页)

20(5):20-23,52.

- [6] Alie C, Backham L, Croiset E, *et al.* Simulation of CO₂ capture using MEA scrubbing: a flowsheet decomposition method[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(3):475-487.
- [7] Zheng Y C, Guo D F, Dong L H, *et al.* Simulation and pilot plant measurement for CO₂ absorption with mixed amines[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4(1):299-306.
- [8] Godini H R, Mowla D. Selectivity study of H₂S and CO₂ absorption from gaseous mixtures by MEA in packed beds[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(4):401-409.
- [9] Pellegrini L A, Muioli S, Gamba S. Energy saving in a CO₂ capture plant by MEA scrubbing[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89(9):1676-1683.
- [10] Hassan S M N, Douglas P, Croiset E. Techno-economic study of CO₂ capture from an existing cement plant using MEA scrubbing[J]. *International Journal of Green Energy*, 2007, 4(2):197-220.
- [11] Zhang D D, Zhao G X, Ng H J, *et al.* Electrolyte model for amine based gas sweetening process simulation[C]//Proceedings of the seventy-eighth annual convention - gas processors association.

Nashville: [s. n.], 1999, 25-31.

- [12] 郑 碲, 董立户, 陈 健, 等. CO₂ 捕集的吸收溶解度计算和过程模拟[J]. *化工学报*, 2010, 61(7):1740-1746.
- Zheng Que, Dong Lihu, Chen Jian, *et al.* Absorption solubility calculation and process simulation for CO₂ capture[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2010, 61(7):1740-1746.
- [13] 李 晗, 陈 健. 单乙醇胺吸收 CO₂ 的热力学模型和过程模拟[J]. *化工学报*, 2014, 65(1):47-54.
- Li Han, Chen Jian. Thermodynamics modeling and process simulation for CO₂ absorption into aqueous monoethanolamine solution[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2014, 65(1):47-54.
- [14] 郑奕成, 郑 碲, 陈 健. 醇胺混合溶剂吸收 CO₂ 的过程模拟[J]. *化学工程*, 2014, 42(7):18-21.
- Zheng Yicheng, Zheng Que, Chen Jian. Process simulation for CO₂ absorption with mixed amine solution[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2014, 42(7):18-21.
- [15] Kent R L, Eisenberg B. Better data for amine treating[J]. *Hydrocarbon Processing*, 1976, 55(2):87-90.

(上接第 68 页)

- [7] Deng C R, Nio T, Sanada Y, *et al.* Relationship between swelling of coal particles and apparent viscosity of slurry during coal liquefaction for Akabira coal/creosote oil slurry system[J]. *Fuel*, 1989, 68(9):1134-1139.
- [8] Okutani T, Yokoyama S, Maekaw Y. Viscosity of coal paste under high hydrogen pressure[J]. *Fuel*, 1980, 59(1):67-69.
- [9] Atesok G, Boylu F, Sirkeci A A, *et al.* The effect of coal properties on the viscosity of coal-water slurries[J]. *Fuel*, 2002, 81(14):1855-1858.
- [10] Schumacher M M. Coal-oil mixture combustion technology[M]. New Jersey: [s. n.], 1981:250-261.
- [11] 韩文煜, 常鸿雁, 张德祥, 等. 油煤浆黏温特性的初步研究[J]. *煤炭转化*, 2003, 26(4):51-54.
- Han Wenyu, Chang Hongyan, Zhang Dexiang, *et al.* Preliminary research on viscosity temperature characteristic of coal-oil slurry[J]. *Coal Conversion*, 2003, 26(4):51-54.
- [12] 高晋生, 常鸿雁, 张德祥. 煤直接液化中煤浆粘度变化研究进展[J]. *煤炭转化*, 2003, 26(3):21-26.
- Gao Jinsheng, Chang Hongyan, Zhang Dexiang. Research progres-

- sion on viscosity change of coal slurry during direct coal liquefaction[J]. *Coal Conversion*, 2003, 26(3):21-26.
- [13] 王永刚, 郝丽芳, 熊楚安. 常压升温下油煤浆表观黏度变化的研究[J]. *燃料化学学报*, 2007, 35(5):513-517.
- Wang Yonggang, Hao Lifang, Xiong Chu'an. Apparent viscosity changes of oil-coal slurry during heating at atmosphere[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2007, 35(5):513-517.
- [14] 林 泉, 冯盈之. 油煤浆表观黏度测量方法的研究[J]. *煤质技术*, 2007(5):41-44.
- Lin Quan, Feng Yingzhi. Study on the method for measuring the apparent viscosity of oil-coal slurry[J]. *Coal Quality Technology*, 2007(5):41-44.
- [15] 舒歌平. 煤炭液化技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003:109.
- Shu Geping. *Coal liquefaction technology* [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2003:109.
- [16] 郝丽芳, 王永刚, 孙秀英. 常压低温条件下油煤浆黏度变化的研究[J]. *煤炭转化*, 2006, 29(2):28-31.
- Hao Lifang, Wang Yonggang, Sun Xiuying. Study on viscosity of oil-coal slurry at low temperature and atmosphere[J]. *Coal Conversion*, 2006, 29(2):28-31.