

文章编号:1673-5005(2011)01-0169-05

# 注空气过程轻质原油低温氧化动力学

侯胜明<sup>1</sup>, 刘印华<sup>1</sup>, 于洪敏<sup>2</sup>, 牛保伦<sup>1</sup>, 任韶然<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**对于埋藏较深且注水困难的低渗透油藏,空气驱可作为二次采油方法。空气驱过程中地层内部分原油将和空气中的氧气发生低温氧化(LTO)反应生成烟道气(主要是 $N_2$ 、 $CO_2$ )和油的氧化产物。通过分析轻质原油低温氧化机制,提出改进的低温氧化反应模型;采用小型台架反应器实验求取改进模型的动力学参数(Arrhenius活化能及频率因子),并利用热采数值模拟方法对氧化管(OT)实验进行历史拟合和验证,同时考察储层岩心对原油低温氧化的影响。结果表明,有储层岩心参与的反应和纯油相比具有较低的Arrhenius活化能和较高的反应频率因子。

**关键词:**反应动力学;低温氧化;反应模型;低渗透油藏;注空气

中图分类号:TE 357.7 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.01.034

## Kinetics of low temperature oxidation of light oil in air injection process

HOU Sheng-ming<sup>1</sup>, LIU Yin-hua<sup>1</sup>, YU Hong-min<sup>2</sup>, NIU Bao-lun<sup>1</sup>, REN Shao-ran<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;  
2. Research Institute of Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Air injection process is an effective secondary oil recovery method for deep and light-oil reservoirs with very low permeability and poor water injection. During air injection, low temperature oxidation (LTO) may occur between a small fraction of reservoir oil and oxygen within injected air to produce flue gas ( $N_2$  and  $CO_2$ ) and oxygenated products. An improved LTO reaction model was established through analyzing light-oil LTO mechanisms. The kinetic parameters, in terms of the Arrhenius activation energy and reaction frequency factor, were obtained from the results of small batch reactor experiments. The improved LTO reaction model and the derived kinetic parameters were verified by history match of oxidation tube experiments using a thermal reservoir simulation model. The influence of reservoir core on LTO was investigated. The reaction with reservoir core materials has lower Arrhenius activation energy and higher frequency factor than that with oil only.

**Key words:** reaction kinetics; low temperature oxidation; reaction model; low permeability reservoir; air injection

注空气技术是深层、高温、注水困难的轻质油低渗透油藏提高采收率经济有效的手段之一<sup>[1-3]</sup>。注空气驱油过程包括轻质原油的低温氧化反应、多相流、热量传递等,建立合适的低温氧化动力学模型是多相流和热量传递研究的基础。轻质原油在油藏温度和压力下的低温氧化反应和重质油火烧油层的燃烧反应有着很大不同,前者原油和氧气的自发反应温度较低(小于300℃),后者人工点燃的反应温度较高(大于350℃)<sup>[4]</sup>。针对轻质原油低温氧化反应的研究<sup>[5-12]</sup>多是在重质油燃烧反应模型的基础上

进行改进,并且进行燃烧管实验的历史拟合,不能很好地解释低温氧化反应机制和直接描述空气注入油藏后自发的低温氧化反应过程。笔者通过建立改进的轻质原油低温氧化反应模型,在100~140℃、20 MPa的胜利油田典型低渗透区块油藏温度和压力条件下,采用小型台架反应器(SBR)进行实验,得到模型动力学参数,利用热采数值模拟方法模拟氧化管实验,对改进的低温氧化反应模型及其动力学参数进行验证。

收稿日期:2010-08-10

基金项目:中国石油化工集团公司先导性科技项目(P06041)

作者简介:侯胜明(1982-),男(汉族),山东临沂人,博士研究生,研究方向为注气提高采收率及油藏数值模拟。

# 1 轻质原油低温氧化反应模型

## 1.1 常用模型

常用的低温氧化反应模型如表 1 所示。

表 1 轻质原油低温氧化反应常用模型

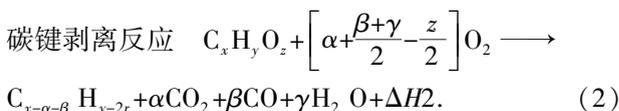
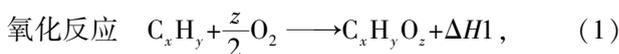
Table 1 Common models of light-oil LTO reaction

文献	模型
Ren 等 <sup>[10]</sup>	$R-CH_3 + 1.5 O_2 \longrightarrow R-CO_2 + H_2 O$ $R-CO_2 \longrightarrow CO_2 + R'$
Clara 等 <sup>[11]</sup>	$CH_x + \frac{y}{2} O_2 \longrightarrow CH_x O_y$ $CH_x O_y + \left[ \frac{2+\beta}{2(1+\beta)} + \frac{x}{4} - \frac{y}{2} \right] O_2 \longrightarrow$ $\frac{1}{1+\beta} CO_2 + \frac{\beta}{1+\beta} CO + \frac{x}{2} H_2 O$
Zwart 等 <sup>[12]</sup>	$C_7 C_{15} + O_2 \longrightarrow H_2 O + CO_x + Heat$ $C_{16} C_{26} + O_2 \longrightarrow H_2 O + CO_x + Heat$ $C_{27+} \longrightarrow Coke + C_7 C_{15}$ $Coke \longrightarrow H_2 O + CO_x + Heat$

Ren 等<sup>[10]</sup>两步反应模型中考虑了部分碳键剥离反应,未考虑 CO 和热力学部分;Clara 等<sup>[11]</sup>模型的优点是轻质原油低温氧化反应机制相近,考虑因素比较全面,但该模型的第二步反应认为中间组分碳氢氧化物  $CH_x O_y$  完全参加反应生成  $CO_2$ 、CO 和  $H_2 O$ ,是根据重质油高温完全燃烧反应得到的<sup>[13]</sup>,实际上轻质原油低温氧化生成的碳氢氧化物仅发生部分的碳键剥离反应,与稠油的高温完全燃烧不同;Zwart 等<sup>[12]</sup>四步反应模型是根据稠油的火烧油层的高温燃烧模型提出的,反应都为完全氧化(燃烧)反应,而实际上原油在低于 300 °C 的氧化反应中并不生成焦炭<sup>[14]</sup>,该模型与轻质原油低温氧化机制相差较大。

## 1.2 改进的轻质原油低温氧化反应模型

根据 SBR 实验结果并结合文献研究成果,在 Ren 等提出的模型基础上进行改进。改进依据的原则为:①符合轻质原油低温氧化反应机制,考虑因素尽可能全面;②模型参数易于通过实验求取,应用于数值模拟计算简单可靠。改进的轻质原油低温氧化模型为



式中,  $\Delta H1$  和  $\Delta H2$  为反应焓变;  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为化学反应系数。

上述两步反应模型中第一步为氧加入到碳氢化

合物中形成碳氢氧化物并放出热量,第二发  $dL$  步为碳氢氧化物继续和氧气反应并发生碳键剥离生成  $CO_2$ 、CO、 $H_2 O$  及新的碳氢化合物。改进的轻质原油低温氧化反应模型考虑了热力学部分,简化了反应物和产物,有利于数值模拟计算。

## 2 系数及动力学参数的确定

改进的低温氧化动力学模型化学反应方程式系数包括  $x$ 、 $y$ 、 $z$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 这些系数的确定需要根据 SBR 实验结果得到。

### 2.1 模型系数

化学反应系数是由参与反应的化合物和反应产物所确定的。由于原油的氧化反应过程复杂,不同温度下的反应物、反应中间产物及最后产物都有很大不同,为了便于计算,模型还需进一步简化。一般认为原油的轻质组分比较稳定,不易被氧化,而原油的重组分(如  $C_{7+}$ )易被氧化,所以在数值模型中可以用拟组分  $C_{7+}$  来代替  $C_x H_y$ 。 $z$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  的值可以通过对反应后的原油和气体组分进行元素分析得到。根据 Duiveman 等<sup>[15]</sup>对 Handil 油田轻质原油进行低温氧化实验得到的结果,生成的烟道气组成为 13%  $CO_2$ 、3% CO 和 84%  $N_2$ ,可假设  $\beta = 3\alpha/13$ 。反应所需的原油分子数、氧分子数及生成的  $H_2 O$  分子数可以通过化学反应平衡求得,其中如  $\gamma = 2(\alpha + \beta)$ ,  $\alpha$  的值可通过 SBR 实验测量反应前后压力值和  $O_2$  及  $CO_2$  来确定, $z$  值根据在恒温条件下低温氧化反应实验对反应前后的原油进行成分分析来确定。

### 2.2 模型动力学参数

在热采数值模拟中化学反应速率根据 Arrhenius 定律来进行计算。设温度为  $T$  时,低温氧化反应模型中第一步反应耗氧速率为  $\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_1$ , 第二步反应耗氧速率为  $\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_2$ , 则两步反应模型的耗氧速率 Arrhenius 定律表示为

$$\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_1 = f_1 \exp\left( \frac{-Ea_1}{RT} \right) [c(C_x H_y)]^{m_1} (p_{O_2})^{n_1}, \quad (3)$$

$$\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_2 = f_2 \exp\left( \frac{-Ea_2}{RT} \right) [c(C_x H_y O_z)]^{m_2} (p_{O_2})^{n_2}, \quad (4)$$

式中,  $f_1$  和  $f_2$  为频率因子,  $1/(d \cdot kPa)$ ;  $Ea_1$  和  $Ea_2$  为 Arrhenius 活化能, J/mol;  $R$  为通用气体常数, 8.31447 J/(mol · K);  $c(C_x H_y)$  和  $c(C_x H_y O_z)$  为反应物浓度, mol/m<sup>3</sup>;  $p_{O_2}$  为氧气分压, kPa;  $m_1$ 、 $n_1$ 、 $m_2$

和  $n_2$  为反应级数;  $T$  为绝对温度,  $K$ 。

在热采数值模拟中需要确定的低温氧化反应模型动力学参数为  $f_1, f_2, Ea_1, Ea_2, m_1, n_1, m_2, n_2$ 。为了在不失准确性的前提下,尽可能降低通过 SBR 实验求取上述参数的难度,进行以下基本假设:①在 SBR 实验中参加反应的原油  $C_xH_y$  相对氧气是过量的,即可以认为  $m_1 = 0$ ;②在同一温度反应过程的稳定阶段,  $C_xH_y, O_2$  的浓度是不变的,即  $m_2 = 0$ 。对简化后的式(3)和式(4)两边取对数得到

$$\ln \left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_1 = \left( \frac{-Ea_1}{RT} \right) \left( \frac{1}{T} \right) + \ln f_1 + n_1 \ln p_{O_2}, \quad (5)$$

$$\ln \left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_2 = \left( \frac{-Ea_2}{RT} \right) \left( \frac{1}{T} \right) + \ln f_2 + n_2 \ln p_{O_2}. \quad (6)$$

式(5)和式(6)中各自需要求取的未知数为 3 个,分别为  $Ea_1, f_1, n_1$  和  $Ea_2, f_2, n_2$ ,只需要选取 3 个温度点的实验数据代入就可以计算得到。然而,实验中单个温度点的实验数据测量误差会造成求取的参数失去准确性,通常采用对所有的实验温度点进行线性插值来拟合 Arrhenius 活化能。下面介绍 Arrhenius 活化能估计值的求取过程。

在 SBR 实验中,反应(2)耗氧速率  $\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_2$  可以通过测量生成的  $CO_2$  平均速率而计算得到,而两步反应总耗氧速率  $\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_{Total}$  可以通过测量消耗氧气的平均速率而得到,那么反应(1)耗氧速率  $\left( \frac{dc(O_2)}{dt} \right)_1$  为总耗氧速率减去反应(2)耗氧速率。

小型台架反应器实验装置主要包括容量为 100 mL 的高压反应器和恒温油浴箱<sup>[16]</sup>。实验中取一定量的原油样品(或原油、地层砂、地层水混合物)放入反应器中,室温下注入高压空气,然后将反应器放入已设定为油藏温度的油浴箱中,反应过程中连续记录反应器内的压力变化。由于  $O_2$  消耗的物质的量多于生成的  $CO_2$ ,反应器内压力呈现下降趋势,可用来计算氧化反应速率。当压力稳定后结束实验,测量反应后气体中的  $O_2$  和  $CO_2$  含量,进行氧气消耗量的计算。根据 Arrhenius 方程对氧气消耗速率和温度的倒数关系进行拟合,计算低温氧化反应动力学参数。纯油实验中原油样品的体积为 50 mL,加入破碎地层岩心的实验中油砂混合物体积为 50 mL。两种情况各自进行了 5 组实验,每组实验恒温油浴的温度保持在 100 ~ 140 °C,间隔为 10 °C,每组实验维持在恒温条件下连续反应,实验中除了温度不同,其他条件保持一致。

实验初始条件和主要结果如表 2 所示。可以看出,纯油实验中加氧反应的耗氧速率在 140 °C 有所降低,油砂实验在 130 °C 有所下降。这主要是由于加氧反应和碳键剥离反应作为主导反应的转变,在接近油藏温度下加氧反应为主导反应,这时其耗氧速率是可靠的,随着温度的升高,碳键剥离反应变为主导反应,加氧反应的耗氧速率将不再可靠<sup>[11]</sup>。基于这个原因,反应(1)的耗氧速率趋势会出现偏差,在活化能计算的拟合阶段要考虑部分数据不可靠因素。

表 2 SBR 实验初始条件和主要结果

Table 2 Initial conditions and main results of SBR experiments

样品	温度 $\theta/^\circ\text{C}$	初始压力 $p_i/\text{MPa}$	结束压力 $p_e/\text{MPa}$	反应时间 $t/\text{h}$	反应结束 $O_2$ 含量 $w_{O_2}/\%$	反应结束 $CO_2$ 含量 $w_{CO_2}/\%$	反应(1) 耗氧速率 $R_1/(\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^3)^{-1})$	反应(2) 耗氧速率 $R_2/(\text{mol} \cdot (\text{d} \cdot \text{m}^3)^{-1})$
纯油 1	100	20.19	19.75	78.66	20.2	0.6	20.32	8.29
纯油 2	110	20.41	19.57	125.27	17.2	1.2	42.74	15.07
纯油 3	120	19.99	19.15	166.87	6.8	3.1	95.65	33.57
纯油 4	130	20.52	19.07	112.55	4.7	7.4	97.24	122.58
纯油 5	140	21.82	18.51	82.12	0.8	13.8	78.57	302.55
油砂 1	100	21.19	20.43	142.68	19.2	1.0	19.87	11.03
油砂 2	110	20.63	20.27	129.94	16.9	2.4	19.86	35.12
油砂 3	120	20.13	18.60	176.25	4.3	8.7	51.90	92.62
油砂 4	130	20.40	18.11	123.04	0.7	13.4	47.93	196.47
油砂 5	140	19.92	17.23	78.56	0.1	14.7	60.18	314.01

对纯油和油砂实验数据进行线性插值见图 1 和图 2, Arrhenius 活化能估计值见表 3。从表 3 可以看出,纯油和油砂氧化反应的活化能都低于碳键剥离反应,说明第一步反应更易于进行。加入破碎地层

岩心后,两步反应的活化能都显著降低,第二步反应频率增加。这说明破碎的储层岩心有类似于催化剂的作用,有助于低温氧化反应。和纯油样相比,有储层岩砂参与的油砂和空气反应具有较低的活化能和

较高的反应频率因子。考虑油砂的实验条件更接近实际油藏,所以确定动力学参数为  $Ea_1 = 48.6 \text{ kJ/mol}$ ,  $Ea_2 = 96 \text{ kJ/mol}$ ,  $f_1 = 6.3 \times 10^5 (\text{d} \cdot \text{kPa})^{-1}$ ,  $f_2 = 1.7 \times 10^8 (\text{d} \cdot \text{kPa})^{-1}$ 。

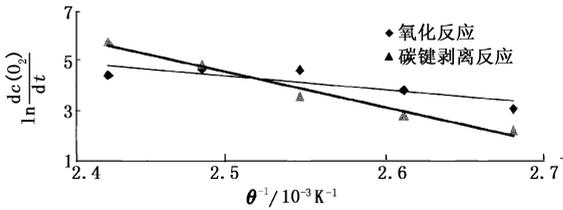


图1 根据纯油 SBR 实验结果计算的动力学参数

Fig.1 Kinetic parameters obtained from results of SBR experiments with oil only

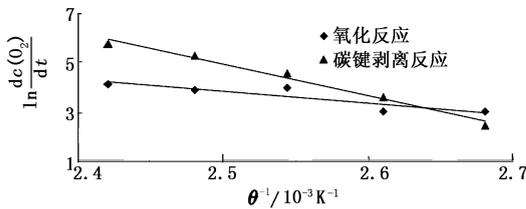


图2 根据油砂 SBR 实验结果计算的动力学参数

Fig.2 Kinetic parameters obtained from results of SBR experiments with oil and sands

表3 根据 SBR 实验计算的动力学参数

Table 3 Kinetic parameters obtained from results of SBR experiments

样品	$Ea_1/$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$Ea_2/$ ( $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	$f_1/((\text{d} \cdot$ $\text{kPa})^{-1})$	$f_2/((\text{d} \cdot$ $\text{kPa})^{-1})$
纯油	65.2	115.2	$6.2 \times 10^5$	$2.0 \times 10^7$
油砂	48.6	96.0	$6.3 \times 10^5$	$1.7 \times 10^8$

### 3 模型及其动力学参数的验证

物理模拟低渗透轻质油油藏注空气过程进行氧化管实验,填砂管模型的内径为 25 mm,长度为 700 mm。采用目标区块破碎岩心及不同粒径的石英砂进行混合配比,并且加入少量高岭土。在填砂过程中依次向填砂管中加入少量砂粒夯击压实,经多次填制最终选出与目标油藏渗透率相近的填砂管模型。该模型空隙体积为 106 mL,孔隙度为 30.86%,水测渗透率为  $17.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,原始含油饱和度为 0.5943  $V_p$  ( $V_p$  为孔隙体积)。填砂管模型压力用回压阀维持在 25 MPa,放置在 109 °C 的恒温箱中。在实验过程中注入空气速率保持在  $2.16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,产出端气体突破后连续进行气体  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  含量测量,在热采数值模拟软件中采用改进的低温氧

化模型和实验求取的动力学参数对氧化管实验进行数值模拟,实验结果见图3。气体突破时,  $\text{O}_2$  含量为 14.5%,  $\text{CO}_2$  含量为 0.4%,很快  $\text{O}_2$  含量升至 20.6%,同时  $\text{CO}_2$  含量降为 0.3%。 $\text{O}_2$  含量变化曲线和实验测量值符合很好,测量值和拟合值几乎重合。在气体突破瞬间  $\text{CO}_2$  含量为 0.8%,然后降低至稳定在 0.4%左右,最终降至 0.1%。在气体突破瞬间气体突破量较小,由于实验室仪器条件限制很难精确测量到,而气体流量较大时可以很准确地测量  $\text{CO}_2$  含量。图3中  $\text{CO}_2$  含量实验值和拟合值在气体突破后的稳定阶段符合较好。可以看出,利用改进的轻质原油低温氧化模型能够对氧化管实验进行很好的历史拟合。

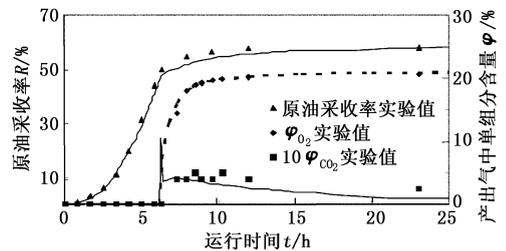


图3 氧化管实验原油采收率及产出气组分含量历史拟合

Fig.3 Oil recovery efficiency and produce gas content of OT experiments and history match

### 4 结论

- (1) 考虑了原油的加氧和碳键剥离反应,建立改进的低温氧化动力学模型,可用于油藏数值模拟。
- (2) 对典型低渗透油藏轻质原油进行低温氧化反应实验,求取低温氧化模型的动力学参数,建立的低温氧化反应模型动力学参数求取方法容易通过 SBR 实验来实现。应用改进的低温氧化反应模型对氧化管实验进行数值模拟,拟合效果较好。
- (3) 破碎的储层岩心有类似于催化剂的作用,有助于低温氧化反应,有储层岩心参与的反应和纯油样相比具有较低的 Arrhenius 活化能和较高的反应频率因子。

#### 参考文献:

[1] MOORE R G, URSENBACH M G. Air injection for oil recovery [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002,41(8):16-19.  
 [2] TURTA A T, SINGHAL A K. Reservoir engineering aspects of light-oil recovery by air injection [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998:336-344.

- [3] GUTIERREZ D, MILLER R J, TAYLOR A R, et al. Buffalo field high-pressure air injection projects: technical performance and operational challenges [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2009, 12(4): 542-550.
- [4] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Oxidation kinetics of North Sea light crude oil at reservoir temperature [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1999, 77(A5): 385-394.
- [5] GUTIERREZ D, MOORE R G, MEHTA S A, et al. The challenge of predicting field performance of air injection projects based on laboratory and numerical modeling [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(4): 23-34.
- [6] GREAVES M, REN S R, RATHBONE R R, et al. Improved residual light oil recovery by air injection (LTO process) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(1): 57-61.
- [7] ADETUNJI L A, TEIGLAND R, KLEPPE J. Light-oil air-injection performance: sensitivity to critical parameters [R]. SPE 96844, 2005.
- [8] ONISHI T, OKATSU K, TERAMOTO T. History matching with combustion-tube tests for light-oil air-injection project [R]. SPE 103848, 2006.
- [9] TAKABAYASHI K, ONISHI T, OKATSU K, et al. Study on minimum air flux for in-situ combustion into light oil reservoir [R]. SPE 116530, 2008.
- [10] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 2002, 7(1): 90-98.
- [11] CLARA C, QUENAULT G, NGUYEN T H. Laboratory studies for light oil air injection projects: potential application in Handil Field [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(3): 239-248.
- [12] DE ZWART A H, VAN BATENBURG D W, TSOLAKIDIS A, et al. The modeling challenge of high pressure air injection [R]. SPE 113917, 2008.
- [13] BURGER J, SOURIEAU P, COMBARNOUS M. Thermal methods of oil recovery [M]. Paris: Editions Technip, 1985: 334-339.
- [14] SARAJI S, OKATSU K, KHARRAT R, et al. Kinetic study of crude-oil in the presence of carbonate rock [R]. SPE 105112, 2007.
- [15] DUBEMAN M W, HERWIN H, GRIVOT P. Integrated management of water, lean gas, and air injection: the successful ingredients to EOR projects on the mature Handil Field [R]. SPE 93858, 2005.
- [16] HOU S M, REN S R, WANG W, et al. Feasibility study of air injection for IOR in low permeability oil reservoirs of Xinjiang Oilfield, China [R]. SPE 131087, 2010.

(编辑 刘为清)

(上接第168页)

- [21] STRAUZ O P, MOJELSKY T W, PAYZANT J D. Upgrading of Albertas heavy oils by superacid-catalyzed hydrocracking [J]. Energy & Fuels, 1999, 13(3): 558-569.
- [22] BABCOCK L M, MORRELL D G. Fluorinated solid acid as catalysts for the preparation of hydrocarbonresins: EP, 0964844 [P]. 2003-08-19.
- [23] JING P, LI Q B, HAN M. Effect of Ni<sup>2+</sup> and Sn<sup>2+</sup> modified SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub> solid super-acid catalysts on visbreaking of heavy petroleum oil [J]. Petrochem Technol, 2007, 36: 237-241.
- [24] 李伟, 朱建华, 齐建华. 纳米 Ni 催化剂在超稠油水热裂解降黏中的应用研究 [J]. 燃料化学学报, 2007, 35(2): 176-180.
- LI Wei, ZHU Jian-hua, QI Jian-hua. Application of nano-nickel catalyst in the viscosity reduction of Liaohe extra-heavy oil by aqua-thermolysis [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2007, 35(2): 176-180.
- [25] CACCIOLA G, ARISTOV Yu I, RESTUCCIAG, et al. Influence of hydrogen-permeable membranes upon the efficiency of the high-temperature chemical heat pumps based on cyclohexane dehydrogenation-benzene hydrogenation reactions [J]. Int J Hydrogen Energy, 1993, 18(8): 673-680.
- [26] 周海安, 史鸿鑫, 项菊萍, 等. W/O 微乳液体系稳定条件与纳米镍的制备 [J]. 工业催化, 2005, 13(5): 46-49.
- ZHOU Hai-an, SHI Hong-xin, XIANG Ju-ping, et al. The stabilization conditions of W/O microemulsion system and preparation of nickel nanoparticles [J]. Industrial Catalysis, 2005, 13(5): 46-49.
- [27] 吴美宁, 史鸿鑫, 周海安, 等. 十二烷基硫酸钠/正戊醇/二甲苯/H<sub>2</sub>O 微乳液及纳米 Ni 催化剂制备 [J]. 纳米加工工艺, 2008, 5(4): 58-62.
- WU Mei-ning, SHI Hong-xin, ZHOU Hai-an, et al. Microemulsion of sodium dodecyl sulfate/n-pentanol/xylene/H<sub>2</sub>O and preparation of nano-Ni [J]. Nano-processing Technique, 2008, 5(4): 58-62.

(编辑 刘为清)