

# 氧化-络合萃取法脱除重质燃料油中硫化物

龙文字<sup>1\*</sup>, 刘继涛<sup>1</sup>, 秦永航<sup>1</sup>, 李晓鸥<sup>1</sup>, 李东胜<sup>1</sup>, 石岩<sup>2</sup>, 程海峰<sup>2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学石油化工学院, 辽宁抚顺 113001;

2. 中国石油抚顺石化公司石油三厂, 辽宁抚顺 113001)

**摘要:**以2种不同的重质燃料油为原料,采用氧化-络合萃取法进行硫化物脱除的单因素与正交实验研究。结果表明,在氧化剂与催化剂体积比为0.7,氧化剂与催化剂体积分数为10.1%,氧化温度为80℃,氧化时间为60 min,络合剂质量分数为0.4%,萃取剂体积分数为1.2,络合萃取温度为84.2℃,络合萃取时间为10 min,水的质量分数为1.7%的条件下,1<sup>#</sup>燃料油精制油硫的质量分数为0.5%,收率为94.9%。在氧化剂与催化剂体积比为0.7,氧化剂与催化剂体积分数为10.5%,氧化温度为62℃,氧化时间为60 min,络合剂质量分数为0.6%,萃取剂体积分数为1.13,络合萃取温度为79.5℃,络合萃取时间为10 min,水的质量分数为1.98%的条件下,2<sup>#</sup>燃料油精制油硫的质量分数为0.49%,收率为94.8%。氧化-络合萃取法可以深度脱除辽化燃料油中的硫化物。

**关键词:**氧化-络合萃取;燃料油;脱硫;收率

**中图分类号:**TE624.512

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2015)12-0101-04

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2015.12.026

## Desulfurization of heavy fuel oil by oxidation-complexation extraction

LONG Wen-yu<sup>1\*</sup>, LIU Ji-tao<sup>1</sup>, QIN Yong-hang, LI Xiao-ou<sup>1</sup>, LI Dong-sheng<sup>1</sup>,  
SHI Yan<sup>2</sup>, CHENG Hai-feng<sup>2</sup>

(1. College of Petrochemical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;

2. PetroChina Fushun Petrochemical Company, Fushun 113001, China)

**Abstract:** Using two kinds of heavy fuel oil, which are refined from the Liaoyang petrochemical company, as raw materials, oxidation-complexation extraction is carried out to reduce the sulfur content. Single factor test and orthogonal test are performed to determine the optimal operation conditions. The results show that the sulfur content and yield of 1<sup>#</sup> refined oil are 0.5 wt% and 94.9%, respectively, under the following conditions: 0.7 of the volume ratio of oxidant to catalyst (Oxi/Cat), 10.1% volumetric fraction of oxidant and catalyst to fuel oil (Oxi plus Cat/Oil), 80℃ of the oxidizing temperature, 60 minutes of the oxidizing time, 0.4% of the mass ratio of complexant to fuel oil (Com/Oil), 1.2 of the volume ratio of extractant to fuel oil (Ext/Oil), 84.2℃ of the extractive temperature, 10 minutes of the extractive time and 1.7% of the mass ratio of water to extractant (Wat/Ext). In contrast, the sulfur content and yield of 2<sup>#</sup> refined oil are 0.49 wt% and 94.8%, respectively, when the Oxi/Cat is 0.7, the Oxi plus Cat/Oil is 10.5%, the oxidizing temperature is 62℃, the oxidizing time is 60 minutes, the Com/Oil is 0.6%, the Ext/Oil is 1.13, the extractive temperature is 79.5℃, the extractive time is 10 minutes and the Wat/Ext is 1.98%.

**Key words:** oxidation-complexation extraction; fuel oil; desulfurization; yield

重质燃料油中的硫质量分数过高会引起金属设备腐蚀和环境污染,根据行业标准 SH/T0356—1996的要求,燃料油硫质量分数不大于0.5%。燃料油脱硫预处理可分为加氢和非加氢2种方法,由于资金、技术及其管理水平的限制,加氢工艺不能在全国范围内推广,而非加氢工艺得到了广泛的应用。非加氢脱硫工艺具有设备投资少,操作费用低,工艺简单等优势,主要包括吸附法<sup>[1-2]</sup>、萃取法<sup>[3-4]</sup>、氧化法<sup>[5-6]</sup>、络合法<sup>[7-8]</sup>等几种工艺。燃料油中的硫化物能被氧化成极性较大的砵、亚砵和硫酸,选用合适的溶剂对氧化后的产物进行萃取,可有效脱除燃料油中的硫化物,因此有关氧化-萃取脱硫的报道较多<sup>[9-11]</sup>。

络合萃取脱硫具有高效性和高选择性<sup>[12-14]</sup>,采用氧化-萃取法脱除燃料油中硫化物时,若在萃取过程中加入络合剂,络合剂与氧化产物生成络合物,

增加了氧化产物在萃取剂中的溶解度,可提高萃取过程的选择性与油品的脱硫率。笔者分别以辽化2种不同的重质燃料油为原料,采用氧化-络合萃取法进行燃料油深度脱硫的研究。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料与试剂

燃料油由辽阳石化公司提供,1<sup>#</sup>燃料油硫质量分数为1.206%;2<sup>#</sup>燃料油硫质量分数为1.194%。

氧化剂主要成分为双氧水,氧化过程中加入少量有机酸催化剂以提高氧化速率;络合剂为自行研制的含Lewis酸的极性络合剂;萃取剂为N-甲基吡咯烷酮。

### 1.2 实验内容与方法

将原料油放入500 mL烧杯中预热至反应温度,将催化剂与氧化剂混合,并加入到盛有原料油的烧

杯中,烧杯置于恒温水浴,在反应温度下搅拌完成氧化过程。将氧化后燃料油倒入抽提器,将络合剂与萃取剂依次加入抽提器,恒定温度下搅拌一定时间后沉降 40 min,完成络合萃取过程。将抽提器上层精制液进行减压蒸溶剂,对精制油称重,计算收率并测定硫质量分数。

### 1.3 分析测试标准

采用 GB/T 387—90 深色石油产品测定法分析油品硫质量分数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氧化-萃取法与氧化-络合萃取法脱硫效果的对比

为了验证络合剂对燃料油脱硫效果的影响,选用 1<sup>#</sup> 燃料油为原料,进行了络合剂质量分数为 0.5% 与不加络合剂的对比实验研究。实验条件为:氧化剂与催化剂体积比为 0.7;氧化剂与催化剂的体积分数  $[V(\text{氧化剂或催化剂})/V(\text{燃料油})]$  为 10%;氧化温度为 80℃;氧化时间为 60 min;萃取剂

体积分数  $[V(\text{萃取剂})/V(\text{燃料油})]$  为 1.2;萃取温度为 85℃;络合萃取时间为 15 min;水的质量分数  $[m(\text{水})/m(\text{萃取剂})]$  为 1.5%。不加络合剂时,精制油硫质量分数为 0.582%,收率为 94.8%;加入络合剂后,精制油硫质量分数为 0.468%,收率为 94.5%。可见络合剂的加入,在不影响精制油收率的前提下,硫化物脱除率提高了 9.5%。与氧化-萃取法相比,氧化-络合萃取法可以深度脱除燃料油中的硫化物,且能维持较高的精制油收率。

### 2.2 操作条件对氧化-络合萃取脱硫效果的影响

实验条件为:氧化剂与催化剂体积比为 0.7;氧化剂与催化剂体积分数为 10%;氧化时间为 60 min;络合剂的质量分数为 0.5%;萃取剂体积分数为 1.2;络合萃取时间为 15 min。1<sup>#</sup> 燃料油氧化温度为 80℃;络合萃取温度为 85℃;水质量分数为 1.5%。2<sup>#</sup> 燃料油氧化温度为 60℃;络合萃取温度为 80℃;水的质量分数为 2%。在上述条件下进行单因素实验,考察操作条件对精制油质量与收率的影响,结果如图 1 所示。

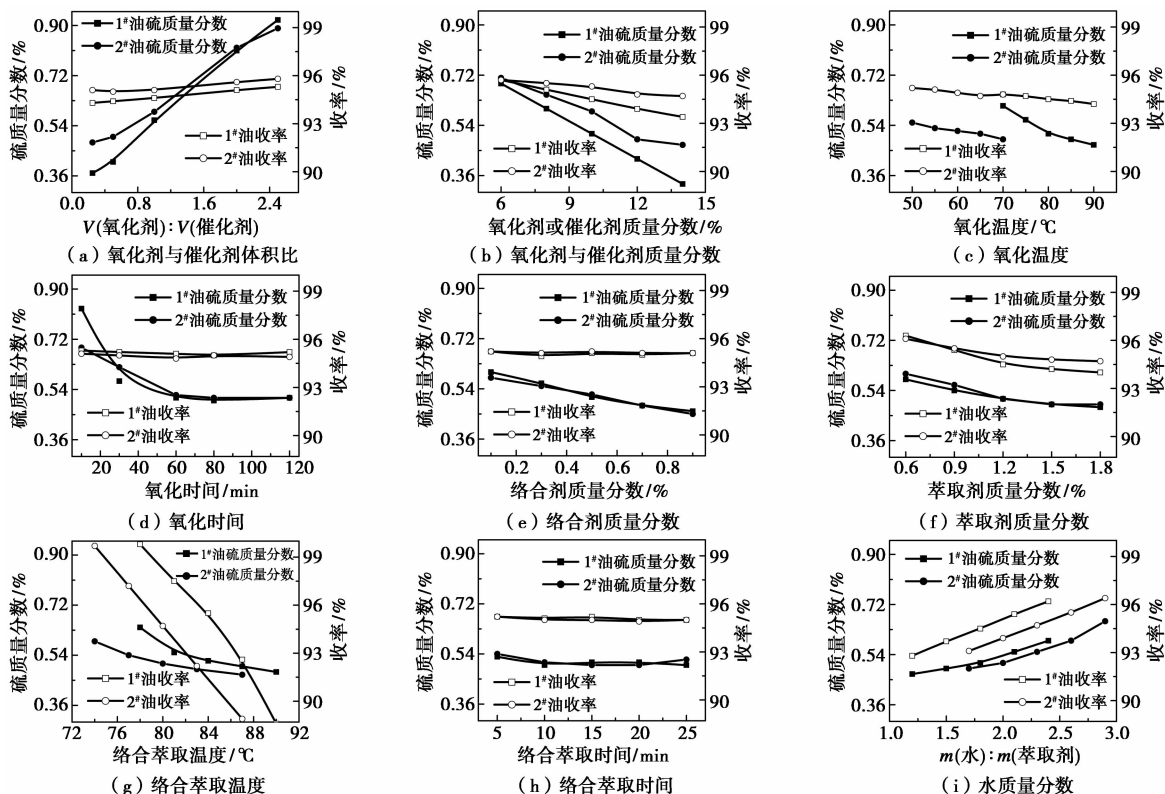


图 1 操作条件对精制油质量与收率的影响

从图 1(a)可以看出,在氧化过程中,随着氧化剂与催化剂体积比的增加,燃料油中硫化物的脱除率显著降低,收率略有增大。这是因为亲水性的氧化剂与亲油性的硫化物只能在两相界面处接触并实

现反应,传质面积小导致传质速率较低,传质过程成为氧化反应的控制步骤。而随着催化剂加入量的增加,氧化剂在燃料油中的分布状态逐渐改善,两相间的传质面积逐渐增加,氧化过程的宏观反应速率逐

渐提高,硫化物的脱除率逐渐变大。从图1(b)可以看出,随着氧化剂与催化剂质量分数的增加,燃料油中硫化物的脱除率升高,收率有所降低。这是因为随着氧化剂与催化剂质量分数的增加,提供活性中心的数目逐渐增多,氧化剂与含硫化物接触几率逐渐增大,砷和亚砷的生成量逐渐提高,氧化过程的选择性也得到提升,硫化物的脱除率逐渐升高。但双氧水在氧化含硫化物的过程中还存在着自身分解的问题,氧化剂加入量过高,双氧水的分解速率也会随之增大,反应选择性变差。同时当极性较高的砷类物质继续被深度氧化时,氧化产物在萃取剂中的溶解度会有所降低,因此氧化剂的加入量不易过高。从图1(c)可以看出,随着氧化温度的升高,氧化剂与含硫化物分子间碰撞激烈程度逐渐变大,氧化反应速率常数也随之增加,燃料油中硫化物的脱除率升高,收率略有降低。但高温下双氧水的分解速率也随之增加,因此氧化温度也不宜过高。从图1(d)可以看出,在氧化过程初期,随着氧化时间的增加,氧化剂与硫化物逐渐接触实现反应,转化为砷类化合物,精制油硫质量分数迅速下降,收率随之略有下降;当氧化时间超过60 min后,氧化反应已达到平衡,硫化物脱除率不发生变化,精制油收率不随氧化时间的变化而改变。

从图1(e)可以看出,在络合萃取过程中,随着络合剂质量分数的增大,燃料油中硫化物的脱除率升高,精制油收率几乎不受络合剂加入量的影响。这是因为络合反应可以使砷类化合物转变为络合产物,相比砷类化合物,络合产物在萃取剂中的溶解度较大,增加了萃取过程的选择性,硫化物的脱除率逐渐升高。从图1(f)可以看出,随着萃取剂质量分数的增大,燃料油中硫化物的脱除率逐渐升高,精制油收率逐渐降低。这是因为随着萃取剂质量分数的增加,络合产物在萃取剂中的浓度逐渐下降,萃取过程传质推动力逐渐增强。但随着萃取剂质量分数的增大,燃料油中部分非含硫极性化合物也转移到溶剂相中,精制油收率逐渐降低。从图1(g)可以看出,随着络合萃取温度的升高,络合反应速率逐渐提高,络合产物在萃取剂中的溶解度迅速增大,燃料油中硫化物的脱除率略有增加,收率显著下降。从图1(h)可以看出,在络合萃取初期,随着时间的增加,精制油硫质量分数逐渐降低,收率随之略有下降;当络合萃取时间超过10 min后,硫化物脱除率不再发生变化,精制油收率不随络合萃取时间的变化而发生改变。从图1(i)可以看出,随着萃取剂含水质量

分数的升高,萃取剂对络合产物的溶解能力逐渐下降,燃料油中硫化物的脱除率逐渐降低,收率逐渐升高。

### 2.3 氧化-络合萃取脱硫适宜操作条件

当氧化时间超过60 min,络合萃取时间超过10 min后,增加时间对精制油的质量与收率均无影响。进行七因素三水平正交试验,实验条件与结果如表1、表2所示。

表1 1<sup>#</sup>燃料油正交实验条件与结果

V(氧化剂)/V(催化剂)	氧化剂体积分数/%	氧化温度/℃	络合剂质量分数/%	萃取剂体积分数/%	络合萃取温度/℃	水的质量分数/%	硫质量分数/%	收率/%
2.0	8	70	0.3	1.2	81	1.6	1.01	99.6
2.0	10	80	0.5	1.5	84	2.0	0.70	95.5
2.0	12	90	0.7	1.8	87	2.4	0.53	91.7
1.0	8	70	0.5	1.8	84	2.4	0.68	96.0
1.0	10	80	0.7	1.2	87	1.6	0.43	92.1
1.0	12	90	0.3	1.5	81	2.0	0.53	97.3
0.5	8	80	0.3	1.5	87	2.4	0.58	93.7
0.5	10	90	0.5	1.8	81	1.6	0.47	95.6
0.5	12	70	0.7	1.2	84	2.0	0.47	95.5
2.0	8	90	0.7	1.5	84	1.6	0.73	93.9
2.0	10	70	0.3	1.8	87	2.0	0.74	92.8
2.0	12	80	0.5	1.2	81	2.4	0.77	99.8
1.0	8	80	0.7	1.8	81	2.0	0.66	97.8
1.0	10	90	0.3	1.2	84	2.4	0.60	97.6
1.0	12	70	0.5	1.5	87	1.6	0.38	90.0
0.5	8	90	0.5	1.2	87	2.0	0.50	93.1
0.5	10	70	0.7	1.5	81	2.4	0.62	98.8
0.5	12	80	0.3	1.8	84	1.6	0.40	92.9

表2 2<sup>#</sup>燃料油正交实验条件与结果

V(氧化剂)/V(催化剂)	氧化剂体积分数/%	氧化温度/℃	络合剂质量分数/%	萃取剂体积分数/%	络合萃取温度/℃	水的质量分数/%	硫质量分数/%	收率/%
2.0	8	50	0.3	0.9	77	1.6	0.93	98.7
2.0	10	60	0.5	1.2	80	2.0	0.66	95.4
2.0	12	70	0.7	1.5	83	2.4	0.53	91.8
1.0	8	50	0.5	1.5	80	2.4	0.57	95.1
1.0	10	60	0.7	0.9	83	1.6	0.46	92.3
1.0	12	70	0.3	1.2	77	2.0	0.53	96.5
0.5	8	60	0.3	1.2	83	2.4	0.59	94.0

续表

V(氧化剂)/V(催化剂)	氧化剂体积分数/%	氧化温度/℃	络合剂质量分数/%	萃取剂体积分数/%	络合萃取温度/℃	水质量分数/%	硫质量分数/%	收率/%
0.5	10	70	0.5	1.5	77	1.6	0.46	94.8
0.5	12	50	0.7	0.9	80	2.0	0.50	95.3
2.0	8	70	0.7	1.2	80	1.6	0.67	93.7
2.0	10	50	0.3	1.5	83	2.0	0.71	92.9
2.0	12	60	0.5	0.9	77	2.4	0.74	99.3
1.0	8	60	0.7	1.5	77	2.0	0.62	97.1
1.0	10	70	0.3	0.9	80	2.4	0.61	97.0
1.0	12	50	0.5	1.2	83	1.6	0.41	90.6
0.5	8	70	0.5	0.9	83	2.0	0.52	93.2
0.5	10	50	0.7	1.2	77	2.4	0.60	98.4
0.5	12	60	0.3	1.5	80	1.6	0.43	92.5

将表 1 与表 2 中的数据进行数学拟合,得到精制油硫质量分数及收率与操作条件之间的级数型经验关联式。1<sup>#</sup>燃料油精制油收率经验关联式为:

$$y = 1.83 + 4.12 \times 10^{-3}a - 2.88 \times 10^{-3}b - 2.92 \times 10^{-4}c - 1.71 \times 10^{-2}d - 9.86 \times 10^{-3}e - 3.03 \times 10^{-2}f + 2.81 \times 10^{-2}g \quad (1)$$

1<sup>#</sup>燃料油精制油硫质量分数经验关联式为:

$$s = 3.38 + 1.66 \times 10^{-1}a - 4.5 \times 10^{-2}b - 4.5 \times 10^{-3}c - 1.75 \times 10^{-3}d - 2.5 \times 10^{-2}e - 8.33 \times 10^{-2}f + 7.5 \times 10^{-2}g \quad (2)$$

2<sup>#</sup>燃料油精制油收率经验关联式为:

$$y = 1.65 + 4.19 \times 10^{-3}a - 2.42 \times 10^{-3}b - 3.33 \times 10^{-4}c - 1.25 \times 10^{-2}d - 8.33 \times 10^{-3}e - 3.22 \times 10^{-2}f + 2.71 \times 10^{-2}g \quad (3)$$

2<sup>#</sup>燃料油精制油硫质量分数经验关联式为:

$$s = 2.53 + 1.33 \times 10^{-1}a - 3.17 \times 10^{-2}b - 3.33 \times 10^{-3}c - 1.75 \times 10^{-1}d - 1.83 \times 10^{-2}e - 1.22 \times 10^{-2}f + 5.83 \times 10^{-2}g \quad (4)$$

式中,  $y$  为精制油收率,%;  $s$  为精制油硫质量分数,%;  $a$  为  $V(\text{氧化剂})/V(\text{催化剂})$ ;  $b$  为  $V(\text{氧化剂})/V(\text{燃料油})$ ,%;  $c$  为氧化温度,℃;  $d$  为络合剂质量分数油,%;  $e$  为络合温度,℃;  $f$  为萃取剂体积分数;  $g$  为水质量分数,%。

以精制油收率最大为目标函数,以硫质量分数不大于 0.5% 为约束条件,对经验关联式求解,获取氧化-络合萃取法脱硫适宜的操作条件,并根据经验关联式计算精制油收率。优化结果如表 3 所示。

为了检验表 3 数据的可靠性,进行了验证实验。结果表明,经过氧化-络合法脱硫,1<sup>#</sup>燃料油精制油

硫质量分数为 0.5%,收率为 94.9%;2<sup>#</sup>燃料油精制油硫质量分数为 0.49%,收率为 94.8%。实验结果与经验关联式预测值基本吻合,说明优化方法在实验条件范围内是可行的,确定的适宜操作条件是准确的。

表 3 优化结果

原料	V(氧化剂)/V(催化剂)	氧化剂催化剂量/积分分数/%	氧化温度/℃	络合剂质量分数/%	萃取剂体积分数/%
1 <sup>#</sup> 燃料油	0.7	10.1	80	0.4	1.20
2 <sup>#</sup> 燃料油	0.7	10.5	62	0.6	1.13

原料	络合萃取温度/℃	水质量分数/%	硫质量分数/%	收率/%
1 <sup>#</sup> 燃料油	84.2	1.70	0.50	95.1
2 <sup>#</sup> 燃料油	79.5	1.98	0.50	95.0

### 3 结论

(1)与氧化-萃取法相比,氧化-络合萃取法在不影响精制油收率的前提下,显著提高了硫化物的脱除率。

(2)在实验条件范围内,随着氧化剂与催化剂配比减少、氧化剂催化剂、络合剂与萃取剂加入量的增加、氧化温度与络合萃取温度的升高及萃取剂含水量的降低,燃料油中硫化物的脱除率逐渐变大,收率逐渐变小。随着氧化时间与络合萃取时间的增加,燃料油中硫化物的脱除率逐渐变大,一定时间后,反应达到平衡,硫质量分数与收率不再发生变化。

(3)在适宜的条件下,经过氧化-络合萃取法脱硫,1<sup>#</sup>燃料油精制油硫质量分数为 0.5%,收率为 94.9%;2<sup>#</sup>燃料油精制油硫质量分数为 0.49%,收率为 94.8%。

### 参考文献

- [1] Tian F, Shen Q, Fu Z, et al. Enhanced adsorption desulfurization performance over hierarchically structured zeolite Y[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 128: 176 - 182.
- [2] Tang M, Zhou L, Du M, et al. A novel reactive adsorption desulfurization Ni/MnO adsorbent and its hydrodesulfurization ability compared with Ni/ZnO[J]. Catalysis Communications, 2015, 61(10): 37 - 40.
- [3] Kianpour E, Azizian S. Polyethylene glycol as a green solvent for effective extractive desulfurization of liquid fuel at ambient conditions [J]. Fuel, 2014, 137(1): 36 - 40.

率的方法设计了结蜡装置,并在该装置上进行防蜡效果评价,如图 1 所示。实验时,将装有 100 mL 原油的烧杯放入恒温水浴锅中,加热至析蜡点以上 5 ~ 10℃,恒温后添加一定量的清防蜡剂并搅拌 20 min 后,放入预热至相同温度的结蜡管,调节结蜡管的位置使原油刚好没过刻度线,而后向结蜡管内通入温度为原油凝点的循环冷却水,30 min 后取出结蜡管,常温放置 24 h 后测量其上结蜡物的质量  $m$ ,计算清防蜡剂的防蜡率:

$$E = [(m_0 - m_1)/m_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E$  为防蜡率,用百分数表示; $m_0$  为未加防蜡剂油样的结蜡质量, g;  $m_1$  为加防蜡剂油样的结蜡质量, g。

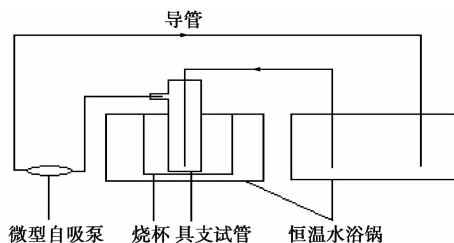


图 1 防蜡率测试装置示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 原油物性分析

按照标准《SY/T 7550—2004 原油中蜡、胶质、沥青质含量测定法》和《SH/T 0659—1998 瓦斯油中饱和和馏分的烃类测定法(质谱法)》对原油进行了成分分析,结果如表 1 所示,烃组成分布如表 2 所示。由表 1 可知,原油含蜡质量分数较高,为 25.5%,而沥青质、胶质及水的质量分数较少。由表 2 可知,油样含有较多的链烷烃、环烷烃及芳烃,所以在选择溶剂时可以优先选择芳烃类和环烷烃类

溶剂<sup>[6]</sup>。

表 1 原油成分分析

成分	石蜡	沥青质	胶质	水
质量分数/%	25.51	0.42	0.00	0.14

表 2 油样中烃组成

成分	链烷烃	总环烷烃	未鉴定芳烃	总芳烃
质量分数/%	44.6	20.1	33.4	1.9

依据标准《SY/T 0541—2009 原油凝点测定法》测定了原油的凝点,并使用黏度计分别测定了原油升温 and 降温过程的粘温曲线,由此获得了原油的溶蜡点和析蜡点<sup>[7]</sup>,结果如表 3 所示。由表 3 可知,原油的凝点为 30℃,析蜡点为 55℃,溶蜡点为 70℃。

表 3 油样物性分析

凝点	溶蜡点	析蜡点
30	70	55

当原油温度低于析蜡点时,石蜡开始结晶析出。此时清防蜡剂中的蜡晶改进剂通过成核、共结晶与吸附 3 种作用抑制蜡晶的长大、聚集及在管壁上的沉积,降低管壁上的蜡沉积量<sup>[8]</sup>。因此,选择 60℃ 作为加药温度,30℃ 作为冷却水的温度。

### 2.2 清防蜡剂的研制

#### 2.2.1 清防蜡剂各组分的筛选

##### (1) 溶剂的确定

溶剂是清防蜡剂的重要组成部分,能够溶解石蜡,达到清蜡的目的。常用的溶剂有二硫化碳、氯仿、二甲苯、汽油、凝析油和石油醚等。考虑到其他类溶剂溶蜡速率较慢,且含氯及硫的溶剂对原油的后续加工危害较大,所以选用二甲苯、煤油及石油醚等 7 种溶剂进行溶蜡速率测试,结果如表 4 所示。

(上接第 104 页)

- [4] Domański U, Walczak K, Królikowski M. Extraction desulfurization process of fuels with ionic liquids [J]. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2014, 77: 40–45.
- [5] Zhang J, Wang A, Wang Y, et al. Heterogeneous oxidative desulfurization of diesel oil by hydrogen peroxide: Catalysis of an amphiphathic hybrid material supported on SiO<sub>2</sub> [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 245(1): 65–70.
- [6] Long Z, Yang C, Zeng G, et al. Catalytic oxidative desulfurization of dibenzothiophene using catalyst of tungsten supported on resin D152 [J]. Fuel, 2014, 130(15): 19–24.
- [7] Wang L, Sun B, Yang F H, et al. Effects of aromatics on desulfurization of liquid fuel by  $\pi$ -complexation and carbon

adsorbents [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 73(7): 208–217.

- [8] Song X, Sun L, He G, et al. Isolated Cu(I) sites supported on  $\beta$ -cyclodextrin: An efficient  $\pi$ -complexation adsorbent for thiophene capture [J]. Chemical Communications, 2011, 47: 650–652.
- [9] 周鸿燕. FCC 模拟汽油中氧化一萃取耦合脱硫研究 [J]. 现代化工, 2014, 34(11): 76–80.
- [10] 张瑾, 戴猷元. 络合萃取技术及其应用 [J]. 现代化工, 2000, 20(2): 19–22.
- [11] 田原宇, 姜少华, 谭军, 等. 络合萃取法精制直馏柴油的研究 [J]. 现代化工, 2000, 20(10): 41–43.
- [12] 陈瑞红, 翟翟璞, 刘永刚, 等. 络合萃取法回收生物油加氢水相中的乙酸 [J]. 现代化工, 2014, 34(9): 114–117. ■