

文章编号:1673-5005(2009)05-0108-06

# 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物对含蜡原油降凝效果评价

杨 飞, 李传宪, 林名桢

(中国石油大学 储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

**摘要:**以长庆、青海含蜡原油为研究对象,考察乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(简称EVA)降凝剂对含蜡原油的降凝效果。利用DSC热分析仪和偏光显微镜考察加剂前后含蜡原油的结晶特性和原油中的蜡晶形貌,并通过凝点和流变试验评价EVA降凝剂对含蜡原油的降凝效果。结果表明:随着分子量的增大,EVA结晶性能稍有提高;随着极性基团含量的提高,EVA结晶性能显著恶化。EVA降凝剂对含蜡原油的降凝效果与原油组成和降凝剂结构有关;随着原油中蜡含量的增大或蜡平均碳数的提高,降凝剂的降凝效果变差;降凝剂的分子量通过影响其在原油中的溶解性来影响降凝效果;EVA极性基团含量过高(大于33%)或过低(小于18%)都不利于降凝,只有在中间范围内时(28%左右),才能起到较好的降凝效果;随着EVA浓度的提高,改性效果先不断提高,然后在高浓度下基本保持不变。

**关键词:** 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物; 降凝剂; 结晶性能; 蜡晶形态; 降凝效果

中图分类号: TE 624.8

文献标识码: A

## Depressive effects evaluation of ethylene-vinyl acetate copolymer on waxy crude oils

YANG Fei, LI Chuan-xian, LIN Ming-zhen

(College of Transport & Storage and Civil Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** Using Changqing and Qinghai waxy crude oils as research objects, the depressive effects of ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymer pour point depressant on the waxy crude oils were studied. The crystallization abilities of waxy crude oils were investigated by differential scanning calorimeter (DSC) and the morphology of wax crystals in the waxy crude oils doped/undoped with EVA was observed through a polarized light microscope. Meanwhile, the depressive effects of EVA on waxy crude oils were evaluated through pour point tests and rheological experiments. The results show that the crystallization ability of EVA improved slightly by increasing the molecular weight of EVA but deteriorated greatly by increasing the VA content. The depressive effects of EVA on waxy crude oils were related not only to the crude oil composition but also to the molecular structure of EVA. With the increase of wax content in crude oils or the average carbon number of waxes, the depressive effects of EVA deteriorated greatly, the molecular weight of EVA affected its depressive effects by controlling the solubility of EVA in waxy crude oils. The depressive effects of EVA were good at the VA content around 28%, when the VA content was too high (>33%) or too low (<18%), however, the depressive effects were poor. The depressive effects of EVA first improved with EVA concentration increasing and then kept nearly unchanged at high EVA concentrations.

**Key words:** ethylene-vinyl acetate copolymer; pour point depressant; crystallization ability; wax crystal morphology; depressive effect

我国盛产高含蜡原油<sup>[1]</sup>,其凝点高、低温黏度大、流变性复杂,这给原油的开采及输送带来很大困难。在原油中添加高分子降凝剂可以改变原油中蜡

晶的结晶形态(结晶大小和形状),使其不易形成空间网络结构,从而达到降凝、减黏,改善含蜡原油低温流变性的目的。目前,高分子降凝剂已广泛应用

收稿日期:2009-02-10

基金项目:国家“863”高技术研究发展计划项目(2006AA09Z302)

作者简介:杨飞(1979-),男(汉族),山东滨州人,讲师,博士,主要从事油田胶体化学及油气储运领域的科研和教学工作。

于含蜡原油的管道输送工艺中<sup>[24]</sup>,但由于降凝剂分子结构的多样性和原油组成的复杂性,人们对降凝剂降凝规律的认识仍显不足<sup>[5]</sup>。乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(Ethylene-vinyl copolymer,简称EVA)是现场应用最广、降凝降黏效果较好的一种原油降凝剂<sup>[6,9]</sup>。笔者选取长庆、青海两种组成不同的含蜡原油,采用DSC热分析仪考察加EVA降凝剂前后含蜡原油的结晶特性,利用偏光显微镜观察加剂前后原油中蜡晶形态的变化,并通过凝点和流变试验评价EVA降凝剂对含蜡原油的降凝效果。

## 1 试验

### 1.1 原料及试剂

#### 1.1.1 试验油样

试验中所用原油为长庆、青海两种含蜡原油,其基本组成与物性如表1所示。可见,长庆和青海原油均属于典型的含蜡原油,蜡含量大,胶质、沥青质含量相对较少。与青海原油相比,长庆原油的蜡含量相对较低,因而其凝点也远低于青海原油。通过气相色谱分析(Agilent 6820 GC)得到长庆和青海原油中正构烷烃的碳数分布,见图1。与青海原油相比,长庆原油中低碳数烷烃的含量较多,正构烷烃的主峰碳为C<sub>15</sub>,且C<sub>10</sub>~C<sub>22</sub>的烷烃含量相对较高,占烷烃总量的67.3%;青海原油正构烷烃的主峰碳为C<sub>20</sub>,且C<sub>15</sub>~C<sub>25</sub>的烷烃含量相对较高,占烷烃总量的68%。

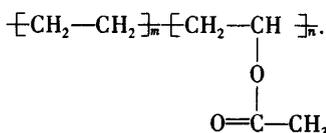
表1 含蜡原油的基本组成与物性  
Table 1 Composition and physical parameters of waxy crude oils

原油种类	质量分数 w/%			凝点 T <sub>v</sub> /℃	初馏点 T <sub>0</sub> /℃	密度 ρ <sub>4</sub> <sup>20</sup> / (g·cm <sup>-3</sup> )
	蜡	胶质	沥青质			
长庆原油	13.3	6.02	0.58	17	58	0.8403
青海原油	21.0	8.82	0.61	33	59	0.8575

注:凝点为原油热处理温度为60℃条件下测量的数据。

#### 1.1.2 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)降凝剂

聚乙烯-醋酸乙烯酯(EVA)是一种二元高分子聚合物,其分子结构如下:



式中,左侧聚乙烯部分为EVA的非极性烷基主链,右侧聚醋酸乙烯酯部分为EVA的极性基团,用VA表示。试验中所用EVA降凝剂均为商业产品,其VA含量主要有4种,即18%,28%,33%和41%;降

凝剂分子量大小用熔体指数来表征,熔体指数越大,降凝剂分子量越小,试验中所用EVA降凝剂的熔体指数在5~400。可以用VA含量与熔体指数相结合的方法来表征某一特定的EVA降凝剂,如EVA1805,EVA28400,前两位数字表示降凝剂的VA含量,后几位数字表示降凝剂熔体指数。

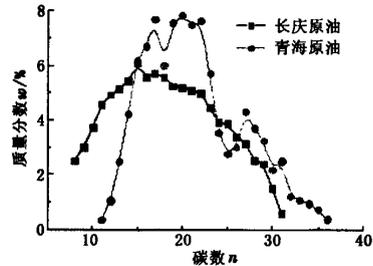


图1 含蜡原油中正构烷烃的碳数分布  
Fig.1 Carbon number distribution of n-alkane in waxy crude oils

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 EVA降凝剂与含蜡原油的DSC试验

利用DSC-821e热流型差示扫描量热仪(瑞士Mettler公司)考察了EVA单体的结晶性能以及加剂前后含蜡原油的结晶特性。对于EVA降凝剂,以10℃/min的降温速率,在100~0℃内对试样进行降温放热扫描,得到样品的结晶放热曲线;对于含蜡原油,以10℃/min的降温速率,在65~-25℃内对试样进行降温放热扫描,得到样品的结晶放热曲线。

#### 1.2.2 显微镜观察

采用带有照相机的日本Olympus BX51偏光显微镜考察了加剂前后原油中蜡晶形态的变化。试验中EVA的加剂量为100 mg/L,加剂温度为60℃,加剂原油降温速率为0.5℃/min。对于长庆、青海原油,分别在5℃,20℃下观察加剂前后蜡晶形态的变化。

#### 1.2.3 EVA降凝剂对含蜡原油的改性效果评价

按照中国石油天然气行业标准——原油凝点测定法(SY/T 0541-94),考察了EVA降凝剂对长庆、青海两种含蜡原油凝点的影响。试验中原油的热处理温度为60℃,降温速率为0.5℃/min。采用德国Haake-RS75控制应力流变仪考察了加剂前后原油低温黏度的变化,试验中剪切速率控制在50 s<sup>-1</sup>。对于长庆、青海原油,分别测量5℃,20℃下原油的动平衡黏度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 EVA 降凝剂与含蜡原油的结晶性能

#### 2.1.1 EVA 的结晶性能

固定降凝剂 VA 含量为 28%, 考察分子量对降凝剂结晶性能的影响, 如图 2(a) 所示。当降凝剂熔体指数为 5 时, 其初始结晶温度为 61 °C, 结晶高峰温度为 53 °C; 当熔体指数为 30 时, 其初始结晶温度降至 58 °C, 结晶高峰温度降至 49 °C; 继续增大降凝剂的熔体指数(即减小分子量), 降凝剂的初始结晶温度降至 55 °C, 结晶高峰温度降至 47 °C 左右。可见, 随着 EVA 分子量的增大, 降凝剂结晶性能有所

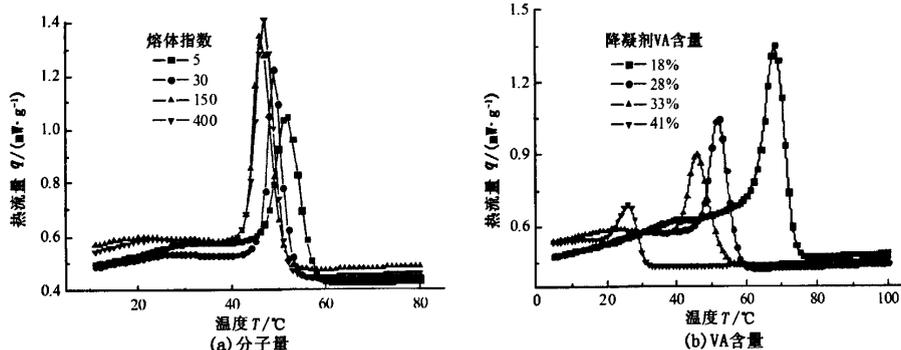


图 2 分子量及 VA 含量对降凝剂结晶性能的影响

Fig. 2 Effect of molecular weight and VA content on crystallization ability of EVA

#### 2.1.2 含蜡原油的结晶特性

Hennessy 等人<sup>[10]</sup>在研究聚丙烯酸酯降凝剂对蜡油中石蜡溶解与析出过程的影响时发现, 降凝剂的加入能够降低蜡油中石蜡的析蜡点。对于添加降凝剂的蜡油, 在降温过程中蜡的析出温度降低, 降凝剂对石蜡分子具有增溶作用。图 3 为加剂前后长庆和青海原油的结晶放热曲线。EVA 降凝剂的加入

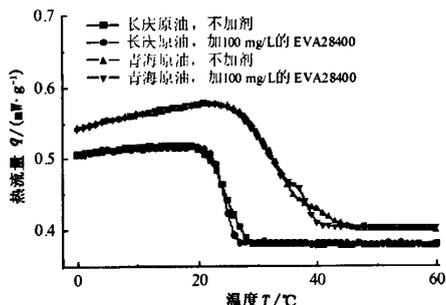


图 3 EVA 降凝剂对含蜡原油中蜡结晶性能的影响

Fig. 3 Effect of EVA addition on crystallization ability of waxes dissolved in waxy crude oils

使原油的析蜡点降低, 长庆原油的析蜡点由 29 °C 降至 26 °C, 青海原油的析蜡点由 45 °C 降至 41 °C。这

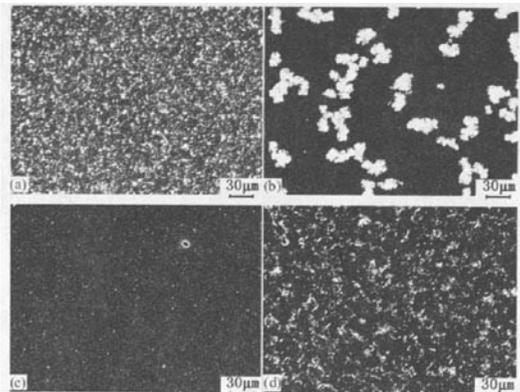
提高, 但提高的幅度较小。选择熔体指数接近的 EVA 降凝剂(分子量基本相同), 考察了 VA 含量对降凝剂结晶性能的影响, 如图 2(b) 所示。当 VA 含量为 18% 时, 降凝剂的初始结晶温度为 76 °C, 结晶高峰温度为 68 °C; 随着 VA 含量的增大, 降凝剂的初始放热温度、结晶高峰温度和单位质量降凝剂的放热量均大大降低, 降凝剂的结晶性能不断恶化。EVA 分子结构中参与结晶的部分为其非极性烷基主链, 随着 VA 含量的提高, 非极性烷基主链在降凝剂分子中所占比重不断减小, 从而导致降凝剂的结晶性能显著恶化。

与 Hennessy 等人的试验结果相一致。对于含蜡原油体系, 当原油中含有 EVA 降凝剂时, 降凝剂分子中与蜡分子结构相似的烷基主链能够通过吸附、共晶作用与原油中的蜡分子相互作用形成有序结构, 增大了石蜡在液态油中的溶解度, 从而使石蜡分子的过饱和度提高, 蜡油的析蜡点降低。

#### 2.2 加剂前后原油中蜡晶的形态

降凝剂分子对原油中蜡晶形态的影响较为复杂, 宋昭峥等<sup>[11]</sup>认为降凝剂的加入能够降低蜡晶尺寸并分散蜡晶, Deshmukh 等<sup>[12]</sup>认为降凝剂的加入能够增大蜡晶的尺寸, 使蜡晶更紧凑。产生上述差异的原因主要是不同种类降凝剂与原油中石蜡分子的作用规律不同。本文中, 控制 EVA28400 浓度为 100 mg/L, 考察了加剂前后蜡晶形态的变化, 见图 4。未加剂原油(图 4(a) 和 (c)) 中析出的蜡晶颗粒细小, 粒径较均一, 并且在原油体系中均匀分散。由于原油体系中存在较大的蜡晶-油界面, 体系的界面能很高, 从而导致在降温或剪切条件下蜡晶颗粒易于相互交联形成三维网络结构, 极大恶化原油的低温流变性。加剂原油析出的蜡晶尺寸变大并且蜡晶聚集趋势非常明显, 尤其是对长庆原油(图 4(b)), 加剂后原油中的蜡晶以团簇状大颗粒的形式存在,

蜡晶结构变得更加紧凑。这导致体系中未被蜡晶占据的空间增大,可流动油分增多,从而提高原油的低温流变性。



(a) 长庆原油, 5 °C, 未加剂; (b) 长庆原油, 5 °C, 加剂;  
(c) 青海原油, 20 °C, 未加剂; (d) 青海原油, 20 °C, 加剂

图 4 EVA 降凝剂对含蜡原油中蜡结晶形态的影响  
Fig. 4 Effect of EVA addition on morphology of wax crystals in waxy crude oils

### 2.3 EVA 降凝剂对含蜡原油的改性效果

#### 2.3.1 分子量对 EVA 改性效果的影响

控制 EVA 降凝剂浓度为 100 mg/L 和 VA 含量为 28%, 考察了分子量对降凝剂改性效果的影响, 如表 2 所示。对于长庆原油, 添加 EVA 降凝剂能够显著降低原油的凝点和黏度, 凝点降低幅度达到 11 °C。随着降凝剂熔体指数的增大(分子量减小), 原油凝点不变, 黏度变化也很小。对于青海原油, 由于原油中蜡含量较高, 且高碳数蜡含量较多, 因而 EVA 降凝效果相对较差, 凝点和黏度的降低幅度均较小。随着降凝剂熔体指数的增大(分子量减小), 原油凝点逐渐降低, 黏度减小, 改性效果得到改善。

表 2 分子量对 EVA 降凝效果的影响

Table 2 Effect of average molecular weight on depressive effect of EVA

含蜡原油种类	凝点 $T_p$ /°C					黏度 $\eta_p$ /(mPa·s)				
	不加剂	5	30	150	400	不加剂	5	30	150	400
长庆	17	6	6	6	6	472	85	85.5	88.5	90.5
青海	33	31	30	30	28	465	312	303	290	215

注:长庆、青海原油的黏度分别在 5 °C、20 °C 测量;第 2 行数据为熔体指数。

由图 2(a)可知,降凝剂分子量对单体的结晶性能影响很小,但分子量会显著影响降凝剂分子在溶液中的溶解性能:随着分子量的增大,降凝剂高分子链段增长,在原油中的溶解性变差,分子链卷曲程度提高<sup>[13]</sup>。可以从 EVA 降凝剂在原油中的溶解性来探讨分子量对含蜡原油降凝效果的影响:①对于长

庆原油,在试验研究的分子量范围内,EVA 降凝剂在原油中的溶解性适中,能够与原油中的蜡分子较好作用,因此原油的凝点、黏度基本不随降凝剂分子量变化。②对于青海原油,由于原油中蜡含量高,高碳数石蜡所占比例大,因此对于分子量较高的 EVA 降凝剂,其在原油中的溶解性较差,降凝剂分子在原油中呈卷曲状,难以与原油中的石蜡分子充分作用,导致原油的凝点、黏度相对较高,降凝、降黏效果较差;随着 EVA 分子量的减小,降凝剂溶解性增强,分子链在原油中逐渐伸展,能够更好地与石蜡分子相互作用,因而原油的凝点和黏度随降凝剂分子量的降低不断减小,降凝、降黏效果得到改善。

#### 2.3.2 极性含量对 EVA 改性效果的影响

控制 EVA 浓度为 100 mg/L,选取熔体指数相近而 VA 含量不同的降凝剂,考察了极性含量对 EVA 改性效果的影响,如表 3 所示。对于长庆原油和青海原油,随着 VA 含量的提高,原油凝点和黏度先逐渐减小,当 VA 含量在 28% 时,改性效果最好;继续提高 VA 含量,EVA 改性效果逐渐变差。可见,当 VA 含量在 28% 左右时 EVA 对含蜡原油的改性效果最好,这同文献上的有关报道相一致<sup>[8]</sup>。当降凝剂 VA 含量过低时(小于 18%),尽管降凝剂的结晶性能较强(如图 2(b)),但极性含量少导致降凝剂分子对蜡晶的分散能力显著恶化,因而原油的凝点、黏度相对较高,改性效果一般;当降凝剂 VA 含量过高时(大于 33%),降凝剂的结晶性能显著降低,在非极性原油中的溶解性变差,导致降凝剂与石蜡的作用减弱,改性效果变差;只有当降凝剂 VA 含量居中时(28% 左右),降凝剂才具有一定的结晶性能和溶解性能,能够与石蜡分子较好地作用,从而取得良好的改性效果。

表 3 极性含量对 EVA 降凝效果的影响

Table 3 Effect of polar content on depressive effect of EVA

含蜡原油种类	凝点 $T_p$ /°C					黏度 $\eta_p$ /(mPa·s)				
	不加剂	18%	28%	33%	41%	不加剂	18%	28%	33%	41%
长庆	17	9	6	6	8	472	102	85	91.8	99.2
青海	33	32	30	30	32	465	376	303	328	401

#### 2.3.3 加剂量对 EVA 改性效果的影响

分别采用 EVA2805 降凝剂,考察了降凝剂浓度对长庆和青海含蜡原油改性效果的影响,如图 5 所示。随着降凝剂浓度的提高,长庆原油的凝点和黏度迅速降低,低温流变性得到很大改善;当降凝剂浓度高于 100 mg/L 时,改性效果基本保持不变。随着

降凝剂浓度的提高,青海原油的凝点和黏度逐渐降低,低温流变性得到改善;当降凝剂浓度高于 300 mg/L 时,改性效果基本保持不变。

由上述分析可知,EVA 降凝剂对长庆原油的感

受性远好于对青海原油的感受性。这是由于青海原油的蜡含量远高于长庆原油,并且石蜡碳数分布也较高,因此 EVA 降凝剂对其感受性差,达到最佳降凝效果时所需的加剂量较高。

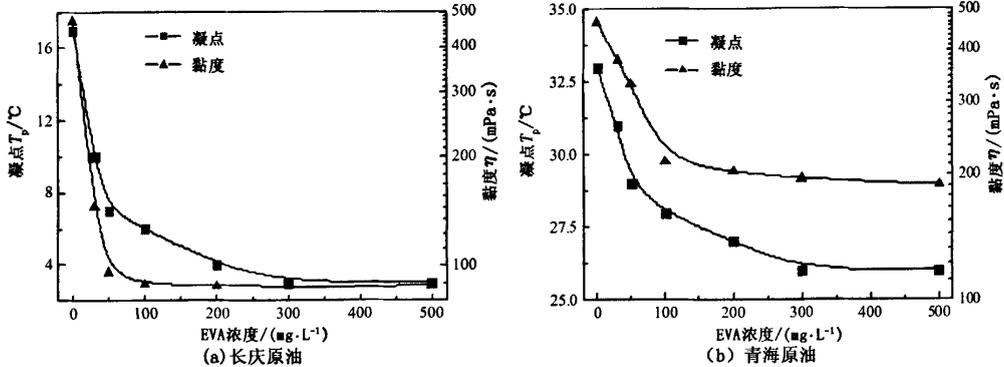


图5 降凝剂浓度对长庆及青海原油降凝效果的影响

Fig. 5 Effect of EVA concentration on depressive effect of Changqing and Qinghai crude oils

### 3 结论

(1)随着分子量的增大,EVA 降凝剂结晶性能稍有提高;随着 VA 含量的提高,降凝剂结晶性能显著恶化。EVA 降凝剂能够通过与石蜡分子的吸附、共晶作用增溶石蜡分子,从而抑制含蜡原油中蜡晶的析出,降低析蜡点。

(2)不加剂含蜡原油中析出的蜡晶颗粒细小,且在原油体系中均匀分散,这导致体系蜡-油界面能较高,蜡晶颗粒易相互交联而形成三维网络结构;加剂后原油中蜡晶尺寸变大并且聚集趋势明显,结构紧凑,从而能够释放更多的液态油,改善含蜡原油低温流变性。

(3)EVA 降凝剂对含蜡原油的降凝效果与原油组成和降凝剂结构特性有关:原油中蜡含量越高、蜡的平均碳数越大,降凝剂对原油的感受性越差,降凝效果也变差;降凝剂分子量通过影响其在原油中的溶解性来影响降凝效果;EVA 极性基团含量过高(大于 33%)或过低(小于 18%)都不利于降凝,只有在中间范围内时(28%左右),降凝剂才能起到好的降凝效果。

(4)降凝剂的改性效果随其浓度的增大不断提高,在较高剂浓度下改善效果基本不变。

#### 参考文献:

[1] 罗塘湖. 含蜡原油流变学的研究发展[J]. 油气储运, 1989,8(3):1-7.  
LUO Tang-hu. Research on waxy crude oil rheology [J].

Oil & Gas Storage and Transportation, 1989,8(3):1-7.

[2] 张劲军, 严大凡. 为管输应用的原油降凝剂效果评价的研究[J]. 石油学报, 1997,18(4):126-130.

ZHANG Jin-jun, YAN Da-fan. Pour point depressant evaluation for pipeline design and operation [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997,18(4):126-130.

[3] 张红, 沈本贤. 原油加剂降凝的研究[J]. 化学通报, 2007,70(1):73-76.

ZHANG Hong, SHEN Ben-xian. Study of crude oil doped with pour point depressant [J]. Chemistry, 2007,70(1):73-76.

[4] 胥思平, 宋昭峰. 胜利原油在原油降凝剂作用下的流变性评价[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(6):107-111.

XU Si-ping, SONG Zhao-zheng. Rheological properties evaluation of Shengli crude oil under the condition of adding pour point depressant [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(6):107-111.

[5] 李传宪, 张春光, 孙德军. 降凝剂与原油组分相互作用的影响因素及降凝剂发展[J]. 化学通报, 2002,65(12):819-823.

LI Chuan-xian, ZHANG Chun-guang, SUN De-jun. The development of PPD and the interactions between PPD and composition of crude oil [J]. Chemistry, 2002,65(12):819-823.

[6] MACHADO A L C, LUCAS E F, GONZÁLEZ G. Poly (ethylene-co-vinyl acetate) (EVA) as wax inhibitor of a Brazilian crude oil: oil viscosity, pour point and phase behavior of organic solutions [J]. Journal of Petroleum

- Science and Engineering, 2001,32(2-4):159-165.
- [7] MARIE E, CHEVALIER Y, EYDOUX F, et al. Control of n-alkanes crystallization by ethylene-vinyl acetate copolymers [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005,290(2):406-418.
- [8] 蒋庆哲, 岳国, 宋昭峥, 等. 乙烯-醋酸乙烯酯的结构与降凝性能的关系[J]. 西南石油学院学报, 2006,28(2):71-74.  
JIANG Qing-zhe, YUE Guo, SONG Zhao-zheng, et al. Relation between structure of ethene-vinylacetate copolymers and their pour point depression [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006,28(2):71-74.
- [9] 柯明, 宋昭峥, 葛际江, 等. 用溶液聚合法合成高相对分子质量的原油降凝剂[J]. 石油大学学报:自然科学版, 2005,29(1):105-110.  
KE Ming, SONG Zhao-zheng, GE Ji-jiang, et al. Synthesis of high-molecular weight ethylene-vinylacetate copolymer as pour point inhibitor for crude oil by solution polymerization [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005,29(1):105-110.
- [10] HENNESSY A J, NEVILLE A, ROBERTS K J. An examination of additive-mediated wax nucleation in oil pipeline environments [J]. Journal of Crystal Growth, 1999,198/199(1):830-937.
- [11] 宋昭峥, 赵密福, 葛际江. 丙烯酸酯降凝剂对蜡晶形态和电性质的影响[J]. 石油学报:石油加工, 2004,20(2):41-46.  
SONG Zhao-zheng, ZHAO Mi-fu, GE Ji-jiang. Influence of pour point depressant on shape and electric properties of wax crystal [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2004,20(2):41-46.
- [12] DESHMUKH S, BHARAMBE D P. Synthesis of polymeric pour point depressants for Nada crude oil (Gujarat, India) and its impact on oil rheology [J]. Fuel Processing Technology, 2008,89(3):227-233.
- [13] 李传宪, 张春光, 孙德军. 降凝剂结构性质对原油化学改性的影响及流变学改进机理[J]. 化学通报, 2002,65(11):762-766.  
LI Chuan-xian, ZHANG Chun-guang, SUN De-jun. The influence of structure of pour point depressant on rheological properties of crude oil and its rheological mechanism [J]. Chemistry, 2002,65(11):762-766.

(编辑 沈玉英)

(上接第107页)

## 参考文献:

- [1] 王朝晖, 张来斌, 辛若家, 等. 声发射技术在管道泄漏检测中的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(2):87-92.  
WANG Zhao-hui, ZHANG Lai-bin, XIN Ruo-jia, et al. Application of acoustic emission technique in pipeline leakage detection [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(2):87-92.
- [2] STROH A N. The theory of fatigue fracture of metals [M]. New York: Haworth Press, 1957:418-465.
- [3] 姚红宇. 腐蚀环境作用下失效的失效分析[J]. 理化检验:物理分册, 2005(41):11-13.  
YAO Hong-Yu. Failure analysis to the failures occurred in corrosive [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2005(41):11-13.
- [4] 钟培道. 断裂失效分析[J]. 理化检验:物理分册, 2005(40):21-24.  
ZHONG Pei-dao. Failure analysis to the failures occurred in corrosive [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2005(40):21-24.
- [5] 褚武杨. 断裂与环境断裂 [M]. 北京: 科学出版社, 2000:8.
- [6] 沈功田. 中国无损检测学会成立 25 周年声发射技术进展论文集 [C]. 北京: [出版者不详], 2003. 6.
- [7] 赵扬译, 李家伟, 华云, 等. 美国无损检测手册超声卷 [M]. 上海: 世界图书出版公司, 1995.
- [8] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] STERN R. Experimental techniques in acoustic emission detection systems [J]. Ultrasonics Symposium, 1972(6): 1-3.
- [10] 林红, 陈国明, 陈养厚. 含裂纹金属拉伸断裂过程的热像检测方法 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2008,32(5):97-102.  
LIN Hong, CHEN Guo-ming, CHEN Yang-hou. Thermographic detection method of tensile fracture process for cracked metal specimens [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(5):97-102.
- [11] 李伟, 陈国明, 郑贤斌. 基于广义回归神经网络的交流电磁场检测裂纹量化研究 [J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(2):105-110.  
LI Wei, CHEN Guo-ming, ZHEN Xian-bin. Crack sizing for alternating current field measurement based on GRNN [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(2):105-110.

(编辑 沈玉英)