

文章编号:2095—0411(2015)03-0045-06

## 含蜡原油降凝剂的研究进展及其应用

赵书华,刘飞飞,王树立,赵会军,李天洲

(江苏省油气储运重点实验室(常州大学),江苏 常州 213016)

**摘要:**含蜡原油输送过程中添加降凝剂可有效的改善原油的流动性,是保证原油安全、经济输送的重要手段之一,新型高效降凝剂的研制开发一直是石油储运工作者研究的重点。通过对国内外原油降凝剂的考察研究,阐述了原油降凝剂的种类、作用机理及影响降凝效果的因素,介绍了降凝剂发展的一个重要方向——降凝剂的复配使用,认为降凝剂的复配使用对于新型降凝剂的研制具有重要的意义。同时对原油降凝剂的作用效果做出了评价,并结合降凝剂在我国长输管道中的应用实例,指出降凝剂开发过程中的难点及今后研究的方向。

**关键词:**原油;降凝剂;作用机理;复配;应用

**中图分类号:**TE 832

**文献标志码:**A

**doi:**10.3969/j.issn.2095—0411.2015.03.009

## Research Progress and Application of Waxy Crude Oil Pour Point Depressant

ZHAO Shuhua, LIU Feifei, WANG Shuli, ZHAO Huijun, LI Tianzhou

(Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Pour point depressant added in the process of waxy crude oil transmission can effectively improve the fluidity, which is one of the important technical means to assure the safety and economy. The development of a high efficiency pour point depressant has been the focus in the study for oil storage and transportation workers. Based on the investigation of oil pour point depressant at home and abroad, this paper expounds the types and mechanism and the main influencing factors of the pour point depressant. An important development direction of the additives about compound use were reviewed. Using complex additives has important implications for the development of new additives. Then, the effect of pour point depressant is evaluated. In addition, some problems and research directions of depressant used in our long-distance pipeline is discussed.

**Key words:** crude oil; pour point depressant; mechanism; compound; application

我国所产原油大多属于含蜡原油,像目前产量较大的大庆、胜利、大港、中原等油田开采的原油,含蜡量在 5%~25%,均属于含蜡或高蜡原油。当其温度较低时会析出蜡晶,随着温度的进一步降低,当

蜡含量达到 2%~3% 时<sup>[1]</sup>,蜡晶便形成“卡片房子状”三维网状结构,使得原油的流动性变差,给原油的输送带来了困难,结蜡造成管道堵塞的事故时有发生,危害严重<sup>[2]</sup>。目前对于蜡含量较高的原油一

收稿日期:2015-01-14。

作者简介:赵书华(1965—),男,山东东阿人,高级实验师,主要从事油气储运和管输技术研究。

般采用物理加热、稀释法、乳化法、水悬浮、添加降凝剂等多种输送方法<sup>[3-4]</sup>。前几种方法普遍能耗高、前期投入大、管理费用高、操作复杂,且现场应用有很大的局限性。添加降凝剂具有投资小,操作简单,无需后处理等特点。为了降凝降耗,减少输油事故的发生,开发研制优质高效的原油降凝剂一直是石油工作者研究的重点和热点<sup>[5-6]</sup>。

原油降凝剂是一种化学合成的高分子有机化合物,能够通过抑制蜡的析出和改善蜡晶的形状(尺寸、大小)进行干扰蜡晶的生长,使蜡分子不能形成空间网络结构,从而达到改善原油流变性的目的。在含蜡原油中添加降凝剂可以有效的改善原油的低温流变性,该技术在低输送量管道安全运行和节能降耗中发挥着极为重要的作用,在高凝含蜡原油中加入降凝剂进行常温输送要比其他方法更安全、更节能<sup>[7]</sup>。此外,在含蜡原油中加入降凝剂可以降低原油中蜡的熔点<sup>[8]</sup>,能够使含蜡原油达到常温输送,甚至低温输送,且在管线停输后易于启动,这对高凝含蜡原油长距离输送有着重要的意义。

## 1 含蜡原油降凝剂的发展概况

原油降凝剂是在馏分降凝剂的基础上发展起来的。目前国外效果较好的降凝剂有表面活性剂型、马来酸酐醇解/胺解型、丙烯酸酯型、乙烯醋酸乙烯酯共聚物型、聚两性电解质型、共聚型降凝剂等 6 种<sup>[9]</sup>。国外原油降凝剂的发展经历了 5 个阶段。第 1 阶段为发现阶段:始于 20 世纪 30 年代,Davis 合成了人类最早应用的降凝剂,其具有良好的效果,此后人们越来越重视降凝剂的开发。第 2 阶段为探索阶段:从 20 世纪 30 年代至 50 年代,从 Davis 合成成功后,人们又相继合成了含有氯化石蜡和酚的缩合物降凝剂(包含聚异丁烯和聚甲基丙烯酸酯等),这一阶段研究的主要方向为馏分油降凝剂,其产物是均聚物。第 3 阶段为扩大阶段:从 20 世纪 50 年代至 60 年代,研究已经转变为在原油降凝剂的基础上对新型降凝剂的开发利用,这一阶段研制出了苯乙烯——马来酸酐共聚物。第 4 阶段为实用阶段:从 20 世纪 60 年代至 21 世纪初,降凝剂开始在长输管道中应用,这一阶段使得降凝剂的使用迅速范围扩大。第 5 阶段为复配阶段:21 世纪初至今,由于降凝剂的降凝机理尚有争议,对于新型降凝剂的研制进展缓慢,降凝剂的研究主要集中在不同降凝剂之间、降凝剂与其他聚合物之间和聚合物之间的复配。

我国原油降凝剂的研究和生产落后于国外数十

年,1984 年才开始见诸文献,近 30 年来降凝剂的研究取得了较大的进步,现已研究出多种类型的原油降凝剂,并成功应用于多条输油管线上。目前,国内研究的重点是复配型降凝剂,其中使用较多的降凝剂是 GY-3,它是以聚丙烯高碳醇混合酯为主的化学复配物<sup>[10]</sup>,其最佳用量为  $50\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右。

## 2 国内外主要原油降凝剂的种类

原油降凝剂根据其降凝原理、化学组成的不同,可以分为表面活性剂型、聚合物型、复配型 3 大类<sup>[11-12]</sup>。

### 2.1 表面活性剂型

表面活性剂是一类能显著降低液体表面张力,改变物质界面活性,具有润湿、降黏降凝、乳化或破乳的化学物质。这类降凝剂成本低、来源广、效果明显,一直被广泛使用。其降凝原理是通过在蜡晶表面吸附,使蜡不易形成遍及整个体系的网状结构而起降凝作用。

### 2.2 聚合物型

这类降凝剂的降凝原理是通过与石蜡共同结晶的机理,使蜡晶的晶型产生扭曲,阻碍蜡晶的长大形成三维网络结构。其主要有 4 种类型:①聚酯类,如:聚(甲基)丙烯酸 C16—C22 烷基酯、聚醋酸乙烯 C14—C22 烷基酯,聚马来酸酯和聚富马酸酯等。②聚烯烃类,以聚 6 烯烃为主。③含氮聚合物,主要是聚胺类或是烷基胺与含有马来酸共聚物作用得到的共聚物,这类降凝剂不仅降凝效果较好,同时在原油中稳定性也极佳。④醋酸-乙烯酯共聚物(EVA)及其改性物,有关研究 EVA 的国内外文献和专利很多<sup>[13-15]</sup>,普遍认为 EVA 是当前效果最好的降凝剂。

### 2.3 复配型

复配型降凝剂利用不同类型的降凝剂进行优选混合调配形成一种新型高效降凝剂。由于原油中石蜡的含量及分子量分布不同,胶质和沥青质的含量及性质也随着原油种类的不同而不同,因而降凝剂对于原油具有很强的选择性<sup>[16]</sup>。主要有聚丙烯高碳醇混合酯(GY)系列、醋酸-乙烯酯共聚物(EVA)系列为主的化学复配物。针对不同原油,开发研制高效复配型降凝剂需求紧迫,意义重大。

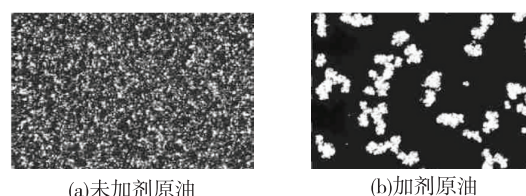
### 3 降凝剂降凝机理

#### 3.1 降凝剂的作用机理

降凝剂的作用机理至今尚未形成充分的共识,国内外学者对这方面做了大量的研究,认为降凝剂并不能阻止石蜡在低温下的析出,它只是改变分散相微粒的大小、形状、结构及流变参数<sup>[17-18]</sup>,从而改善含蜡原油的低温流动性能。目前,普遍认为原油降凝剂作用机理有3种类型:晶核作用、吸附作用和共晶作用。①晶核作用:同胶质沥青质类似,在成核阶段,降凝剂在高于油品浊点温度下结晶析出,降凝剂起晶核作用而成为蜡晶发育的中心。②吸附作用:在蜡晶的生长阶段,降凝剂在略低于油品浊点温度下,降凝剂分子会吸附在已生成的蜡晶的表面,从而改变蜡晶的取向,减弱蜡晶间的粘附作用。③共晶作用:当油品处于浊点温度以下时,油品中相匹配的降凝剂的烷基链与蜡分子共晶析出,但由于整个降凝剂分子与蜡分子结构性能的差异。随着降凝剂浓度的增加,晶体逐渐转变为不规则的锥形和柱形,不仅增加了蜡晶体积对表面积之比,而且使得网络结构难以形成,故会出现大块的晶体<sup>[19]</sup>。

近年来随着降凝剂的开发和理论研究,逐渐形成了一些新的降凝理论,比较有代表性的有以下几种观点:①吸附-共晶理论:LORENSEN等<sup>[20]</sup>人提出了降凝剂能抑制蜡晶中三维网状结构生成,吸附与共晶是同时发生的,吸附形成共晶。但从结晶学观点来看,晶格对一般杂质具有排斥性解释,这种观点似乎不太严格。②溶蜡理论:张拂晓等<sup>[21]</sup>研究者认为降凝剂如同表面活性剂,加降凝剂后增加了蜡在油品中的溶解度,使析蜡量减少,同时又增加了蜡的分散度,且蜡分散后的表面电荷的影响,蜡晶之间相互排斥,不易形成三维网状结构,从而降低了原油的黏度和凝点。③抗凝胶化理论:研究者从胶体学方面考虑,认为原油在温度降低后之所以凝固,主要是蜡晶发育和凝胶化的过程,降凝剂使蜡晶絮凝体稠密化,使晶体的数量大大减少,在原油中形成粗大松散的结构,或锥状,或球状,比表面积变小,降低了其表面活性能,不易形成胶凝结构,从而使原油的凝点降低<sup>[22]</sup>。图1是在显微镜下观察到的大庆含蜡原油的加剂前后的蜡晶显微照片。

总之,降凝剂的作用机理与原油的组成结构密切相关,不同的降凝剂对于原油的适用性不同,有可能几种作用同时存在,也许只存在某种主要作用。



(a)未加剂原油 (b)加剂原油

图1 大庆含蜡原油加剂前后的蜡晶结构对比

Fig.1 Daqing waxy crude oil and wax crystal structure before and after constaint agent

试验证明:原油在降凝过程中共晶和吸附作用是主要的,晶核作用是次要的,总的作用结果是使原油的形态发生改变,晶体变小,改变原油的三维网状结构,从而降低原油的凝点和黏度,使流动性得以改善。

#### 3.2 影响降凝剂降凝效果的因素

影响降凝剂降凝效率的因素很多<sup>[23-26]</sup>,可归纳分为内部因素和外部因素2个方面。内部因素主要考虑原油的化学组成和结构,外部因素主要考虑加剂处理条件和管道输送条件。

#### 3.3 原油降凝剂的效果评价

原油降凝剂降凝效果主要考虑其凝点降低的幅度。除此之外,还应从以下几个方面来考虑:①能够大幅降低含蜡原油的凝点;②能够大幅度降低原油的反常点,扩大原油的牛顿流体范围;③降低原油在低温下的表观黏度;④能够大大减弱非牛顿原油的剪切稀释性、触变性和黏弹性;⑤能够大幅度降低原油的屈服值和具有较好的稳定性,加剂效果的时效性要长。

降凝剂的降凝效果一般都是通过实验测定,如图2是大庆含蜡原油在70℃条件下,不加降凝剂与加降凝剂的黏温曲线对比,由图中可以看出,加剂后该原油的反常点由54.0℃降低到36.5℃,原油凝点降幅达18℃左右,低温下的表观黏度显著降低,其低温流变性变好,并且使得其牛顿流体温度范围向低温方向拓宽,图中非牛顿流体范围的曲线分散程度明显减小,表明剪切稀释性减弱。

### 4 复配降凝剂的特点

复配降凝剂是一类优质高效的新型降凝剂,近年来已成为国内外开发研究的热点<sup>[27-29]</sup>。相比于单一降凝剂,复配降凝剂在降凝降黏方面具有显著特点:①改变凝点附近低温区域原油中蜡晶的网状

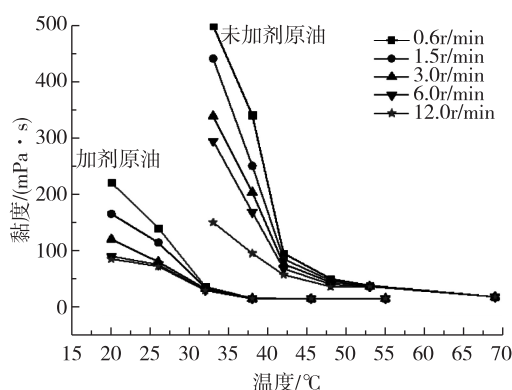


图2 大庆加剂原油和未加剂原油的黏温曲线对比

Fig.2 The viscosity temperature curve comparison of crude oil in Daqing with pour point depressant and without pour point depressant

结构,使其凝点降低的过程中也具有降黏的作用;②使其牛顿流体温度范围向低温方向拓宽,从而使原油低温流变性变好;③由于原油是混合物,含有多种烃成分,其侧链烷烃长度范围分布较广,不同降凝与降黏剂之间复配可以增强其与不同原油侧链烷烃的匹配性。

目前,比较常用的制备方法主要有:降凝剂之间的复配、降凝剂与表面活性剂复配以及降凝剂与极性化合物复配。

#### 4.1 降凝剂之间的复配

一般选择一种对原油降凝效果较佳的降凝剂作为主剂,选择几种与之主碳链不同的降凝剂作为助剂进行复配,从而使主碳链的范围扩大,原油不同碳链的蜡晶被覆盖的范围增大,从而提高降凝剂的降凝降黏作用。目前常用的是以 EVA 系列为主剂、

其他降凝剂为助剂进行复配。

#### 4.2 降凝剂与表面活性剂复配

原油和降凝剂对表面活性剂的选择性很强,只有结构相似才能有很好的配伍性。具有较长直链和较大的空间结构的表面活性剂易于与蜡分子结合,其较大的空间结构可阻碍蜡晶的生长<sup>[30]</sup>。

#### 4.3 降凝剂与极性化合物复配

一般采用共聚、加成或接枝等聚合方法对降凝剂分子引入如磺酸基、氨基等极性基团,极性基团带有相同的电荷而彼此排斥,阻止蜡晶聚集,从而达到降凝降黏的效果。

### 5 原油降凝剂在长输管道中的应用

20 世纪 60 年代末,降凝剂开始应用在原油开采及长输管道上,起到了很好的降凝效果。我国于 20 世纪 70 年代开始将自制的降凝剂应用于胜利、新疆、长庆等地。鲁宁线全长 655km,是我国采用降凝技术的距离中输量最大、距离最长的原油管道。我国参与建设的苏丹输油管道,全长 1 506km,按添加降凝剂改性原油黏度常温输送设计,减少沿途布设加热站数量,节省建设投资费用  $6.0 \times 10^7$  美元,同时,每年节省加热输送所需燃料费用  $6.2 \times 10^6$  美元<sup>[31]</sup>。库尔勒-鄯善输油管道:全长 473km,是国内第一条按降凝剂改性常温输送设计的长距离输油管道。

到目前为止,我国已经有鲁宁线、中洛线等数十条管道采用添加降凝剂输送,现场应用效果十分明显,典型数据见表 1。

表 1 降凝剂现场应用效果

Table 1 The field application effect of reducing agent

管线名称	降凝剂	加剂量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	加剂前/后凝点/℃	降凝幅度/℃	加剂前/后黏度/(mPa·s)	降黏率/%
鲁宁线	BEM	40	24/5	19	3228/498 <sup>1)</sup>	84.6
中洛线	BEM	50	32.5/13	19.5	1172/60	93
濮临线	BEM	50	32.5/14.5	18	763/19	97.5
魏荆线	BEM	50	36.5/23	13	1720/119	93
东黄线	BEM	50	17/4	20	396/334	15.7
东临复线	BEM	50	23/3	20	408/314	23
马惠宁线	GY	50	16/-4.5	20.5	2174/74.2 <sup>2)</sup>	96.6
花格线	CE	100	33/15	18	2365/255 <sup>3)</sup>	89.2
库鄯线	GY	11	1/-11	12	293/31.8 <sup>4)</sup>	89.1
火山线	EP	50	10/4	6	1536/258 <sup>5)</sup>	83.2
东辛线	PAE	10	27/10	17	2418/476 <sup>6)</sup>	80.3

1) 为 25℃, 2) 为 5℃, 3) 为 20℃, 4) 为 2℃, 5) 为 10℃, 6) 为 20℃, 其余均为 30℃。



由表 1 可知,降凝剂在我国长输管线上对管输原油取得了较好的降凝和降黏效果,加剂前后凝点变化比较大,降凝幅度大多在 10℃ 以上,特别是马惠宁线、东临复线、东黄线降凝幅度都能达到 20℃ 以上。此外,加剂前后黏度变化也比较明显,降黏率大多能达到 80% 以上,濮临线、马惠宁线降黏率能达到 95% 以上,对于原油管输改性效果特别明显。

此外,复配降凝剂在马惠宁输油管线上进行现场试验,加降凝剂实现了冬季 4 个月的常温输送,其凝点由 16℃ 降至 -2℃,降凝剂处理过的原油与加热输送的原油同期相比,油耗降低 56%,电耗降低 8%<sup>[32]</sup>。陈五花等<sup>[33]</sup>人利用烷基萘做降凝剂,对于大庆含蜡原油具有良好的降凝效果,加入 0.1% 的烷基萘降凝剂其凝点由 32.5℃ 降至 24℃,原油的流变性能得到了明显改善。表 2 为国内部分降凝剂的应用概况。

表 2 国内部分降凝剂应用概况

Table 2 The application overview of some pour point depressants in China

降凝剂	适用管线
CE 系列降凝剂	花格线、中洛复线、濮临线、河石管线、鲁宁线、荆晋线
BEM 系列降凝剂	濮临线、魏荆线、鲁古线、东黄线、东临复线、洪荆线
GY 系列降凝剂	中洛线、马惠宁线、秦京线、库鄯线、花格线
WHP 降凝剂	鲁宁线

6 原油降凝技术在开发中存在的问题

近年来,原油降凝剂的研究和应用工作虽然取得了较大的进展,开发出了的多种原油降凝剂并在应用中取得了明显的效果,但仍然存在一些问题。主要表现在:①对于原油降凝剂机理研究很多,但有些理论仍处在研究探索阶段,尚未形成共识,有待进一步验证,这在很大程度上制约了降凝剂研究的进展速度。目前还是以 EVA 型降凝剂处于主导地位。②单一的原油降凝剂结构性质的局限性以及新型原油降凝剂开发缓慢。③原油加剂改性效果的不稳定。已有报道加剂原油在长输管道输送中会使原油的低温流变性恶化,这可能会造成管道无法运行,甚至凝管的灾难性后果。

7 原油降凝技术发展前景展望

1)继续对原油降凝剂机理研究,以指导新型高效原油降凝剂的研制和应用,计算机模拟就是一种

简单的研究降凝剂和蜡晶的相互作用的新方法,但目前尚不成熟。

2)不同原油降凝剂之间、降凝剂与降黏剂(如具有支链极性官能团的油溶聚合物等)之间、降凝剂与表面活性剂之间的复配,成为原油降凝剂研究和开发的一个重要方向。

3)结合现有计算机技术研究加剂原油改性流动性预测技术,已掌握原油管输过程中加剂原油的流动性的变化,诸如压力、温度等条件的变化。

4)纳米技术在降凝技术上的应用。已有报道采用纳米技术的降凝剂能够有效改善原油的流动性,不仅有利于实现长距离原油的常温输送,还可以减少管道的运行费用,保障管道的安全运行,具有良好的应用前景。

参考文献:

[1]张劲军. 易凝高粘原油管输技术及其发展[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 72-75.

[2]王哲, 马贵阳. 管输含蜡原油降凝技术研究进展[J]. 当代化工, 2014, 43(12): 2588-2590.

[3]RADULESCU A, SCHWAHN D, STELLBRINK J, et al. Wax crystallization from solution in hierarchical morphology templated by random poly (ethylene-cobutene) self-assemblies [J]. Macromolecules, 2006, 39(18): 6142-6151.

[4]孙海超, 刘英杰, 杨基和. 原油低温破乳剂的研制[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2014, 26(4): 11-15.

[5]PRANAB G, MOUMITA D. Study of the influence of some polymeric additives as viscosity index improvers and pour point depressants-synthesis and characterization[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 119: 79-84.

[6]徐伟, 周立, 冯成, 等. 对影响我国加剂原油改性效果的分析[J]. 工业技术, 2011(11): 70-71.

[7]周浩, 赵德智, 戴咏川, 等. 大庆高蜡原油降凝效果评价[J]. 石油化工高等学校学报, 2011, 24(4): 44-47.

[8]CHEN Wuhua, ZHAO Zhongchang, YIN Caoyong. The interaction of waxes with pour point depressants[J]. Fuel, 2010, 89(5): 1127-1132.

[9]马素俊, 马天太, 杨景辉, 等. 国外降凝剂的研究现状和合成趋势[J]. 精细石油化工进展, 2013, 14(6): 38-41.

[10]连艺秀, 杨文川, 王幸, 等. 易凝高黏原油的改性输送工艺[J]. 油气田地地面工程, 2014, 33(4): 23-24.

[11]梁青诚, 周漳睿, 卢丽, 等. 原油流动性改进剂研究现状[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(3): 37-39.

[12]HAFIZ A A, KHIDR T T. Hexa-triethanolamine oleate esters as pour point depressant for waxy crude oils[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 56(4): 296-302.

[13]ANDRE L, MACHADO C, ELIZABETE F, et al. 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: 159-165.
- [14] RASHA A, EL-GHAZAWY, AVMAN M Atta. Modified maleic anhydride-co-octadecene copolymers as flow improver for waxy Egyptian crude oil[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 122: 411-419.
- [15] 杨飞, 李传宪, 林名桢, 等. 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物对含蜡原油降凝效果评价[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(5): 108-113.
- [16] SIDDHARTHA S, BRIAN F, Towler. Diachronic viscosity increase in waxy crude oils[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 43(1): 13-23.
- [17] 张金俊, 关建宁, 宋娜, 等. 降凝剂对原油中蜡晶形态的影响[J]. *石油学报*, 2010, 26(1): 27-30.
- [18] CHEN Wuhua, ZHAO Zongchang. The interaction of waxes with pour point depressants[J]. *Fuel*, 2010, 89(5): 1127-1132.
- [19] 代晓东, 贾子麒, 李国平, 等. 原油降凝剂的作用机理及其研究进展[J]. *油气储运*, 2011, 30(2): 86-89.
- [20] 王丽娟, 田军. 聚合物型原油降凝剂的作用机理与应用[J]. *精细石油化工*, 1997(5): 5-8.
- [21] 张拂晓, 方龙, 聂兆广, 等. 高凝原油降凝剂的制备及其降凝机理[J]. *石油学报*, 2009, 25(6): 801-805.
- [22] LIU Tao, FANG Long. Preparation of a kind of reactive pour point depressant and its action mechanism[J]. *Fuel*, 2015, 143: 448-454.
- [23] ANA-ERCEG K, MARKO R, GROZDANA B. Studies on the influence of long chain acrylic esters polymers with polar monomers as crude oil flow improver additives[J]. *Fuel*, 2008, 87(13): 2943-2945.
- [24] SRUSHTI D, 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): 227-233.
- [25] AL-SABAGH A M, NOOR EI-D M R, MORSI R E. Styrene-maleic anhydride copolymer esters as flow improvers of waxy crude oil[J]. *Journal of petroleum Science and Engineering*, 2009, 65(3): 139-146.
- [26] JAFAR B T, GOLPASHA R. Effect of wax inhibitors on pour point and rheological properties of Iranian waxy crude oil[J]. *Fuel Processing Technology*, 2008, 89(10): 973-977.
- [27] 王景昌, 赵建涛, 杜中华, 等. 高凝点原油降凝剂的研制与复配[J]. *石油化工高等学校校报*, 2011, 24(5): 14-16.
- [28] WU Chuanjie, ZHANG Jinli, LI Wei. Molecular dynamics simulation guiding the improvement of EVA-type pour point depressant[J]. *Fuel*, 2005, 84(16): 2039-2047.
- [29] AL-SABAGH A M, EI-HAMOULY S H, KHIDR T T. Synthesis of phthalimide and succinimide copolymers and their evaluation as flow improvers for an Egyptian waxy crude oil[J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2013, 22(3): 381-393.
- [30] PASADKIS N, SOURLIGAS S, FOTEINOPOULOS C. Prediction of distillation profile and cold properties of diesel fuels using mid-IR spectroscopy and neural networks[J]. *Fuel*, 2006(85): 1131-1137.
- [31] 陈刚, 张洁. 原油流动性改进剂研究进展[J]. *天然气与石油*, 2013, 31(2): 1-3.
- [32] 黄新. 原油降凝剂复配及降凝降粘规律的研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011.
- [33] 陈五花, 陈建. 降凝剂对原油石蜡沉积的影响[J]. *当代化工*, 2013, 42(4): 386-389.

(责任编辑:殷丽莉)