

# 天然气减阻剂研究进展

王剑波<sup>1</sup>, 王晓霖<sup>2</sup>, 陈建磊<sup>2</sup>, 赵巍<sup>2</sup>

(1. 中国石化销售有限公司管道处, 北京 100728;  
2. 中国石油化工股份有限公司抚顺石油化工研究院, 辽宁 抚顺 113001)

**摘要:** 减阻剂加注是一种重要的天然气管道增输技术, 加注减阻剂克服了管道内涂层使用寿命短、易脱落、不可再次涂覆、无法应用于旧管道和施工复杂等缺点, 可有效提高输送量, 并能保证管线的安全运行。综述了天然气减阻剂的减阻机理及国内外关于减阻剂发展的技术现状, 详细叙述了天然气管道实施减阻的原因、减阻剂的室内成膜性和稳定性评价以及环道评价测试装置和测试过程。依据合成方法, 将减阻剂分为 Mannich 碱类、咪唑啉类、酰胺类、磷酸酯类和聚合物类, 并分别对其进行了论述和举例。同时还指出了天然气减阻剂的适用范围, 从减阻机理、分子结构设计、评价方法和现场应用技术等方面提出了目前研究中存在的问题, 对于深入研究减阻剂减阻机理、合成、评价方法和在大口径管线的应用提出了一些建议。

**关键词:** 天然气; 管道; 减阻剂; 缓蚀剂; 合成

**中图分类号:** TE869      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2016)02-0040-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.02.007

## Research Progress in Drag Reducing Agents with Inhibition Performance for Natural Gas

WANG Jian-bo<sup>1</sup>, WANG Xiao-lin<sup>2</sup>, CHEN Jian-lei<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>

(1. Pipeline Institution, Sinopec Sales Co., Ltd, Beijing 100728, China;  
2. Sinopec Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China)

**ABSTRACT:** Drag reducing agents (DRAs) technology is an important technology in pipeline transportation for natural gas. DRAs can overcome the defects of undercoat, such as short service life, ease to fall off, unable to be re-coated, and not applicable to old pipeline, complex construction, and so on. DRAs can effectively improve the flow and meanwhile ensure the safe operation of the pipeline. In this paper, the current research status of the drag reducing agent technology for natural gas as well as the drag reducing mechanism was reviewed. The reasons for the drag reduction of natural gas pipeline, evaluation of indoor film forming and stability for DRAs, and device and procedure of loop testing were discussed in detail. According to the synthesis method, DRAs were classified as Mannich bases, imidazolines, amides, phosphates and polymers. And they were discussed and illustrated respectively, on the basis of classification. And the scope of application for DRAs was given and the existing problems in research were

收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2015-12-30

Received: 2015-11-11; Revised: 2015-12-30

基金项目: 中国石化科技发展项目(314045)

Fund: Supported by the Technology Development Project of Sinopec (314045)

作者简介: 王剑波(1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为成品油管道运行管理。

Biography: WANG Jian-bo(1970—), Male, Senior engineer, Research focus: operation management of product oil pipeline.

通讯作者: 赵巍(1983—), 男, 工学博士, 主要研究方向为高分子材料及添加剂的合成。

Corresponding author: ZHAO Wei(1983—), Male, Ph. D., Research focus: synthesis of polymer and additives.

presented from the aspects of mechanism, design of molecular structure, evaluation methodology and technology of practical application. Some suggestions were given for drag reducing mechanism, synthesis, evaluation methodology of drag reducing agents and their application in large-diameter pipeline.

**KEY WORDS:** natural gas; pipeline; drag reducing agents; corrosion inhibition; synthesis

天然气的主要运输方式是管道输送,其优点有成本低、输量大、安全性高、连续性好等。随着世界能源需求量的持续增长,高压、大口径、高效率输送将成为天然气管道未来的发展方向。但是,管道输送天然气目前还存在一些问题<sup>[1-3]</sup>:

1) 输量应变能力受到限制。管道的运行必须限制在设计输量范围内,如果运行压力超出这个范围,则会增加管道的安全风险,还会由于能量损耗过大而降低效益。

2) 水力摩阻产生沿程压降。管输天然气必然存在摩擦阻力,会导致沿程压力减小和能量损失,因此天然气管道长输工程中需要设增压站。

3) 季节性调节输气量。受季节性影响,某些地区对天然气的需求量有所不同,因此要求天然气输量具有调节功能。

4) 管内介质产生安全隐患。如管道积液、腐蚀、冻堵等,会影响输送。

对天然气管道实施减阻可以解决以上问题,通过减阻可以:1)降低管道的摩擦阻力,提高内壁光滑程度,提高管道输送效率,减少能量损失;2)提高输量弹性,在不影响工艺条件的前提下,可以调节管道输送量,满足不同季节和不同地区的需求;3)降压而不降低输量运行,在保证输气量不变的情况下,降低输送压力,对于出现腐蚀或损伤的长期运行的管道,可减少事故发生;4)具有防止管道内腐蚀等辅助功能<sup>[2-3]</sup>。

## 1 天然气管道减阻技术

### 1.1 减阻的原因

天然气输送包括完全湍流和部分湍流两种流态,而由于流速快、压力高、管径大,天然气管道主干线几乎都运行在完全湍流的阻力平方区域内<sup>[1-3]</sup>。

天然气在管道内流动方式为湍流流动,气体绕过内壁粗糙凸点时,会产生脱流现象,形成涡流区,在凸点前后将产生较大的压差,即阻力损失,其大小与涡流强度和涡流区域的大小有关,而涡流区的大小又与粗糙度有关。在其他条件不变时,产生的阻力损失会随着粗糙度的增加而增大(如图1所示<sup>[1-2]</sup>)。除此

之外,临近壁面的天然气还会受到壁面粗糙度的阻挡而发生散射和反射,产生径向脉动<sup>[1-3]</sup>。

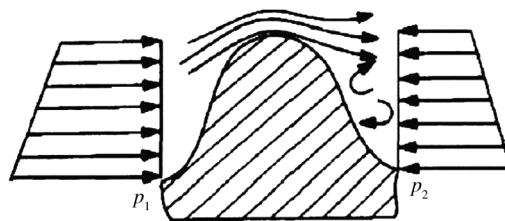


图1 凸出物剖面压力分布

Fig. 1 Pressure distribution of projection profile

当流体管道稳定运输时,外界提供的管道两端压差等于管道摩阻压降与管道两端高程差之和。其中管道两端的高程差是由于地形地势导致,无法改变。因此提高管道输量有两种办法:一是提高泵压,管道输量随之提高,这是常用方法;二是减小流体沿管道流动的摩擦阻力,在泵压不变的情况下提高管道输量,这是减阻增输方法,其中最重要的手段是应用内涂层技术和管道化学添加剂<sup>[4-7]</sup>。

### 1.2 减阻技术

#### 1.2.1 内涂层减阻技术

若将涂料涂覆在管道内壁且涂料厚度大于内壁粗糙度,使内壁表面变得光滑,则可以降低粗糙度(如图2所示<sup>[8-9]</sup>),减少摩擦阻力,增加输量,提高天然气输送效率。20世纪50年代后,内涂层技术在天然气长输管道内进行了大规模应用,应用的管线见表1<sup>[1-5,8-9]</sup>,广泛应用的涂层材料有环氧树脂型涂料等<sup>[8-9]</sup>。

国外应用于输气管道的减阻涂料产品有荷兰式玛 FLOWCOAT03、英国伊伍德公司的 EP2306HF 和 COPON、丹麦 Hempel 85442、德国 Permecor337 等。我国管道内涂层技术的研究已有二十多年,取得了巨大进展,中石油的 AW-01 涂料及中科院金属所的 SLF-21 涂料已获得工业化应用。尽管内涂层技术的应用已经取得了巨大进展,但还存在一些不足<sup>[1-9]</sup>:

1) 不适合在小管径输气管道上应用。考察国外的应用情况,通常当管径大于 500 mm 时才考虑采用

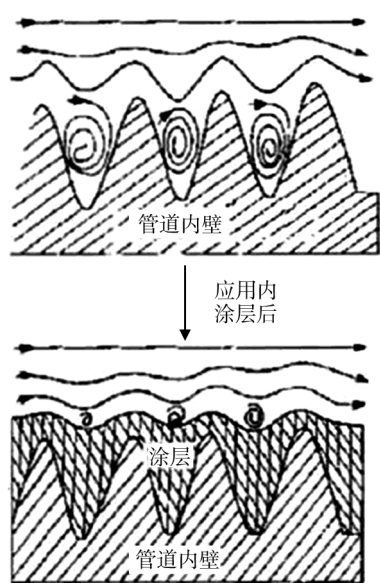


图2 管道内壁涂层减阻模拟

Fig. 2 Simulation of undercoat drag reducing in pipeline

表1 采用内减阻涂层的长输天然气管道技术参数

Tab. 1 Technical parameters of drag reducing undercoat in long-distance natural gas pipeline

管道	投产时间	长度/km	最大管径/mm	压力/MPa
邓比尔-佩恩输气管道	1984	1420	660	8.5
Statepipe 海底管道	1985	800	914	13.4
西班牙东北输气管网	1990	765	762	7.2
Zeepipe 海底管道	1993	814	1016	15.7
Alliance 管道	2000	2988	1067	<12
西气东输一线	2004	4000	1016	10
川气东送	2009	2000	1016	10
西气东输二线	2012	8700	1219	12

内涂层。

2) 内涂层有一定的使用寿命,管道快速泄压和清管等外力作用会使涂层出现起泡、剥离现象。

3) 一次性涂覆,不可再次施工。内涂层的应用通常是在管道钢出场后涂覆在内壁,再到现场连接,一旦剥离脱落,不可再次涂覆。

4) 不可用于旧管道。对于早期建成的没有实施减阻的管道,无法应用内涂层技术。

5) 内涂层施工工艺比较复杂。

### 1.2.2 天然气减阻剂

为了克服内涂层减阻技术的不足,20世纪50年代,有研究者提出了气体管道使用减阻剂的可能性,随后许多研究者也致力于研究天然气管输减阻剂的

作用机理。到目前为止,人们公认的天然气减阻剂机理为,利用具有表面活性剂性质的化合物,其极性端与管道金属内表面牢固粘合,形成一层具有以下作用的有机薄膜<sup>[1-9]</sup>:1)降低管道的绝对粗糙度,即光滑减阻(在管道内壁,吸附层形成新的壁面,在管道粗糙凸起底部,减阻剂分子吸附堆积,填塞内壁表面的凹陷和沟槽,从而降低粗糙度);2)降低气体的径向脉动和粗糙凸起产生的脉动,同时减小涡流能量。

根据减阻剂作用机理分析,天然气减阻剂产品若要用于管道增输,必须满足如下要求<sup>[10-12]</sup>:1)具有较强的吸附力,可稳定吸附于管道内壁;2)具有可以吸收气体湍流能的柔性长链;3)具有适当的蒸气压和溶解性,易雾化,且能在管道内壁凝结吸附,形成连续稳定的膜;4)对管道内壁无腐蚀作用。由此可见,天然气减阻剂的技术特点为:

1) 不受管道内径的约束,既可用于服役的旧管道,又可用于新建管道。

2) 可根据需要加注,一次性投入费用低,能有效增强管道的输送弹性,节省成本。天然气减阻剂的应用克服了费用较高和施工复杂的内涂层减阻方法的缺点,施工时只需选择管道适合的位置,采用类似缓蚀剂雾化注入设备加入即可。

3) 采用间隔式连续注入方式,解决了内涂层随时间延长不断脱落而使减阻效果逐渐降低,甚至产生负效应的难题,这一点尤为突出地表现在旧管道改造中。

4) 用量少且脱离速度慢,使得真正进入天然气中的减阻剂近于痕量,对天然气气质的影响可忽略不计。

5) 保持相同压力降,在气体管道中,减阻剂的应用可提高气体流量10%~30%。

### 1.3 减阻剂的室内评价方法

目前,减阻剂实验室评价方法有减阻剂成膜性评价、成膜稳定性评价和室内环道评价<sup>[13-15]</sup>。天然气减阻剂成膜性与成膜稳定性普遍采用扫描电子显微镜(SEM)和电化学分析(EA)进行表征<sup>[13-25]</sup>。

#### 1.3.1 SEM表征

将除锈的钢片打磨至光滑。配制一定浓度的减阻剂溶液,并喷涂于钢片表面,或将钢片浸入配制的减阻剂溶液中浸泡一段时间后取出,自然晾干,应用SEM观察减阻剂在钢片表面能否形成致密的薄膜。

#### 1.3.2 EA表征

电化学阻抗实验是一种准稳态测试方法<sup>[13-15]</sup>,具有较高的实验重复性,是目前应用极为广泛的频域



测量技术。与其他传统电化学方法相比,电化学阻抗实验可以得到更多的电极过程动力学信息,被公认为研究膜电极表面动力学的权威工具。该评价技术可以表征电子在膜表面的传递行为,并得到电极反应动力学参数,除了可以研究膜自身的电阻特征、成膜对溶液和基底间电子传递的阻碍作用外,还可以定性和定量分析成膜的致密程度。

电化学极化实验广泛应用于缓蚀剂评价,可定量判断缓蚀效率和缓蚀剂类型,同样也适用于天然气减阻剂的评价。测得的自腐蚀电流偏移量标志着缓蚀效率的大小,也是形成稳定膜的标志。根据这种分析方法,可以判断出天然气减阻剂的成膜位置与成膜能力的强弱<sup>[14-18]</sup>。

应用电化学分析评价的具体操作为:配制具有一定浓度的减阻剂溶液,喷涂于铁电极表面,再将铁电极浸于电解池溶液中,通过测试电化学阻抗谱(EIS)

和电化学极化曲线(Tafel曲线),得出相关电化学参数,进而对该减阻剂产品进行性能评价。

### 1.3.3 室内环道评价

国内实验环道系统都由各研究机构自行建立,室内环道系统流程图见图3。测试管段经过碱洗、酸洗、水洗、吹干的预处理过程后,安装在测试系统中,将配制的减阻剂溶液由加剂罐经雾化喷嘴喷入测试环道中,监测环道流量,通过传感器和数据采集系统采集测试环道两端测定点的压力数据及减阻率。评价参数为减阻率和有效时间,有效时间( $t$ )为注入减阻剂后产生减阻效果到减阻效果完全消失的时间,减阻率(DR)的表示方法为:

$$DR = \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{\Delta P_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta P_1$  为管道涂膜前两点间的压力差,Pa;  
 $\Delta P_2$  为管道涂膜后两点间的压力差,Pa。

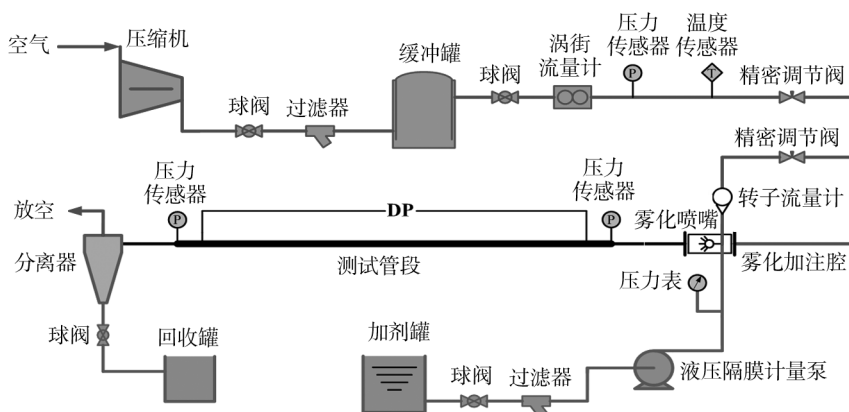


图3 天然气减阻剂室内环道评价系统流程

Fig.3 Flowchart of indoor circuit evaluation system for nature gas DRA

## 2 减阻剂的合成进展

早在1956年,美国石油协会就提出气体管道使用减阻剂的可能性。早期并没有真正意义上的减阻剂,其主要来源于其他管道添加剂,如缓蚀剂、表面活性剂等。20世纪90年代,人们正式提出了天然气减阻剂概念,方法是定期向天然气管道内注入表面活性剂类化合物,该化合物吸附于管道内表面,形成弹性分子薄膜,降低管道内壁粗糙度,达到减阻的目的<sup>[5]</sup>。

20世纪90年代初,Atlantic Richfield Company (Los Angeles, Calif.) 申请了关于气体管道减阻技术的美国专利,即在管道内注入具有非极性和极性基团的减阻剂,极性基团一端粘附于管道内壁上,非极性基团

一端处于流动气体与管壁之间,减小在气固界面处流体的湍动,使管壁变平滑,减少管壁与气流之间的摩擦。该减阻剂是类似于抗蚀剂、润滑剂类的脂肪酸、酰胺或烷氧基化的脂肪酸等<sup>[2-4]</sup>。同一时期,Ying-Hsiao Li进行了Nalco945抗蚀剂的现场试验,实验地点在墨西哥一条输送干气的近海管道上。该管道长6.25英里(10058.1 m)、内径7.625英寸(0.19 m)。实验结果显示,在控制排出压力为840 psi(5.79 MPa)时,管道压力由180 psi(1.24 MPa)降至150 psi(1.03 MPa),流率则由50MMscf/d增至52MMscf/d。减阻效果在注入处理后的第三周达到最好效果,作用持续两个多月<sup>[8-9]</sup>。

20世纪90年代末,Huey J. Chen进行了将缓蚀剂用作减阻功效的现场试验,地点在墨西哥的一条天

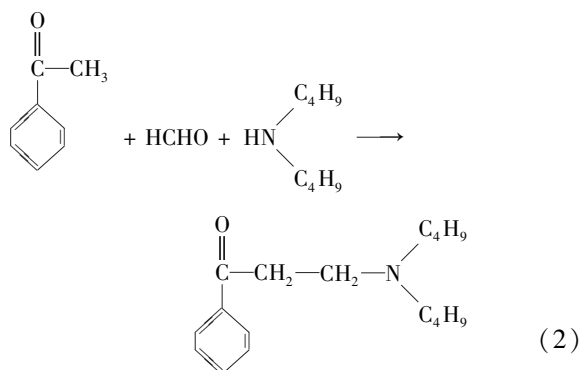
然气输送管道上。试验管道为 6-in Schedule-80 海底管道,总长度约 5 英里(8.05 km),自墨西哥湾的 Mobile863A 平台延伸到 Mobile864B 平台。试验所用抗蚀剂包括烷氧基化脂肪酸胺、酰胺类和脂肪酸。结果表明,减阻剂的效用持续大于 400 h,可降低压降 15% ~ 20%,提高气体通过量 10% ~ 15%<sup>[10-11]</sup>。

除此之外,国外应用缓蚀剂等添加剂作为减阻作用的产品还有美国产品 Nalco945、970、4970、3515、3516, Chemlink C-171、C-129、C-114、C-143、C-115, Prudhoe Bay crude 和 Kuparuk crude,此外还有加拿大的 Witcamine 0515 缓蚀剂等<sup>[5-12]</sup>。国外应用的具有减阻效果的添加剂产品特点为减阻效果持续时间较长,输气量提高较大,兼有减阻和缓蚀功能。但国外产品在天然气管道中形成的液膜过厚,长期使用会开裂,有脱落的负面影响,不利于解决管道内表面粗糙度问题。目前国外已没有相关报道,大多数天然气管道仍然应用内涂层减阻技术。

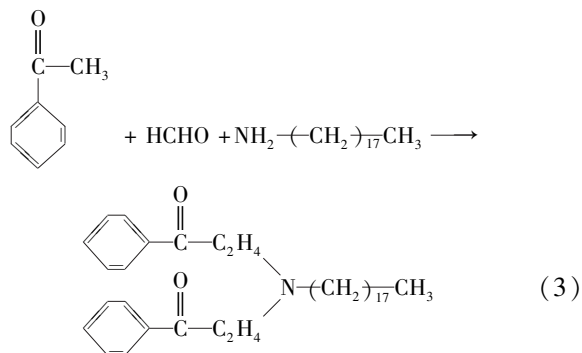
我国关于天然气减阻剂的研究开展较晚,直至 21 世纪后才有相关的研究工作发表,而针对减阻剂的研究机构也较少,且大部分研究源于缓蚀剂的合成与应用<sup>[26-32]</sup>。目前主要有中国石油管道科技中心、中国石油大学(华东)和山东大学等院所和机构开发相关产品和技术,研发了 5 类 10 余种天然气减阻剂样品,其中部分进行了工业试验,主要可分为 Mannich 碱类、咪唑啉类、酰胺类、磷酸酯类和聚合物等<sup>[5]</sup>。

## 2.1 Mannich 碱类

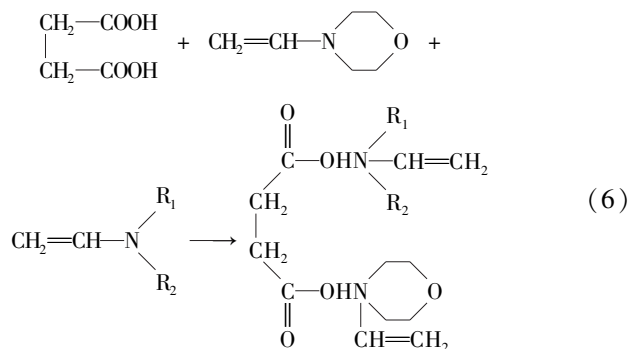
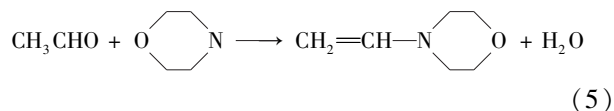
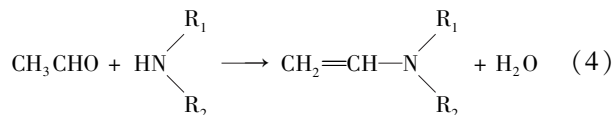
此类减阻剂的典型产品为苯乙酮二丁胺 Mannich 碱,其合成过程见(2)式<sup>[33]</sup>。该产品为红棕色液体,与乙醇任意比例互溶。成膜性实验中,金属表面粗糙度虽然已经降低,但是仍能看到明显的粗糙度。该减阻剂在钢片表面的成膜性及膜稳定性良好,在模拟凝析液体系中没有明显发生化学变化,实验前后粗糙度明显增加。



苯甲酮类长链胺基化合物也是这类减阻剂的代表<sup>[33-34]</sup>,其反应过程见(3)式。该产品为红色固体,由于非极性分子链过长,所以溶解性差。成膜性实验后,在 SEM 下观察,该产品兼具非极性长链的填充能力与优良的极性端吸附性能,所以金属表面粗糙度明显降低。环道评价结果显示,该产品不仅没有产生减阻效果,反而增加了气体流经管道时的流动阻力。

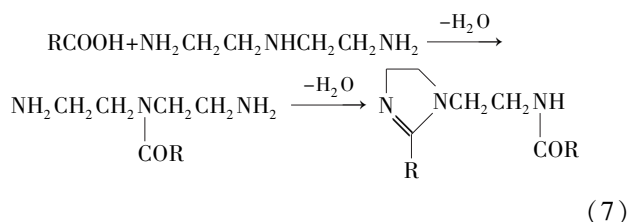


Mannich 类减阻剂产品中最典型的是中国石油管道科技中心开发的 BIB Mannich 碱<sup>[35-36]</sup>,其合成过程见(4)~(6)式。该粗产品为红色固体,室内性能评价结果表明,BIB 减阻率稳定在 13% ~ 15%,有效期超过 30 d。此外,中石油还进行了多次 BIB 现场加注实验。



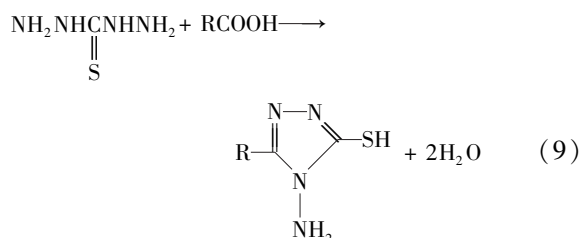
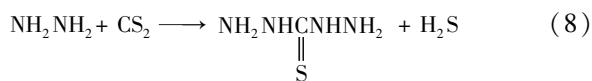
## 2.2 咪唑啉类

此类减阻剂的典型产品为硬脂酸咪唑啉、油酸咪唑啉和松香酸咪唑啉等<sup>[37-46]</sup>,其合成反应式见(7)式。分子式中  $\text{R}=\text{C}_{18-54}$ 。当  $\text{R}$  为  $\text{C}_{17}\text{H}_{33}$  时,产品为油酸咪唑啉;当  $\text{R}$  为  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}$  时,产品为硬脂酸咪唑啉。与 Mannich 碱相比,咪唑啉类减阻剂的合成过程较为复杂,需要减压反应,且反应温度较高。



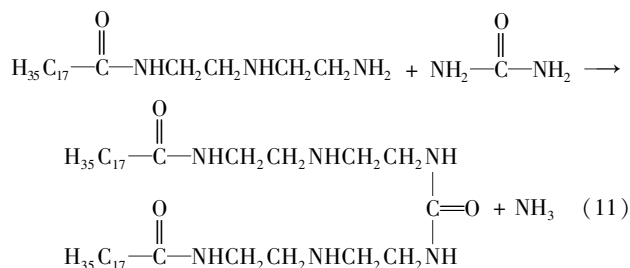
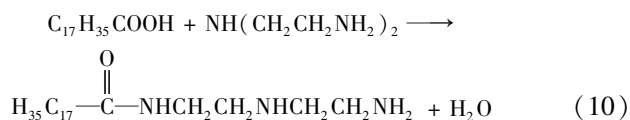
硬脂酸咪唑啉为淡黄色固体粉末。成膜性测试表明,其在钢片表面形成一种致密且完整的薄膜,有效降低了钢片表面的粗糙程度;室内环道测试结果表明,其平均减阻率可达8.4%。松香酸咪唑啉的合成方法与硬脂酸咪唑啉类似<sup>[19]</sup>,但反应温度要达到230~240℃,体系的真空度要控制在20~40 mmHg。

此类减阻剂产品还有三氮唑类化合物,如胺基巯基均三氮唑<sup>[37,39,47-48]</sup>,其化学反应式见(8)和(9)式,最终产品为淡红色固体。溶液配制时,其主要成分为巯基三唑化合物,与成膜助剂马来酰亚胺、二甲基硫代氨基甲酰氯、苯磺酰胺、氨基丙二酸乙酯和1-萘胺-5-磺酸进行复配后,产品具有良好的减阻效果。采用SEM观察该产品处理后的钢片表面,可以发现形成了一层完整致密的薄膜,降低了钢片的表面粗糙程度,使钢片表面变得较为平滑。电化学分析测试表明,与空白铁电极相比,巯基三唑化合物成膜后的铁电极容抗弧直径明显增大,电荷传递电阻变大,化合物的成膜性能较好。将该产品加入腐蚀介质中,并进行电化学极化曲线测试,结果表明,电极的腐蚀电位值变化较小,主要是通过几何覆盖成膜对阴、阳极反应起抑制作用。环道测试中,其减阻率最大可达10.03%。

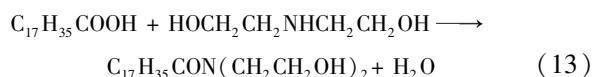
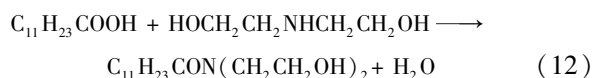


### 2.3 酰胺类化合物

此类减阻剂的典型例子为多酰胺基化合物<sup>[49]</sup>,其合成过程见(10)和(11)式,得到的产品为淡黄色固体。SEM观察表明,经其处理后的钢片表面粗糙度有了明显改善,表面凹处被化合物填充得比较均匀,但是其室内环道的测试效果不如烷基咪唑啉减阻剂。

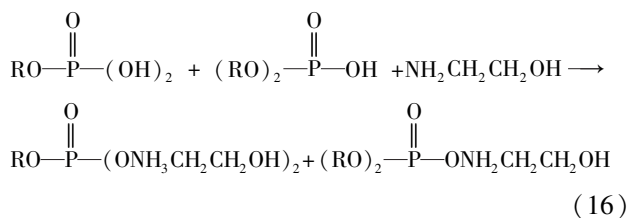
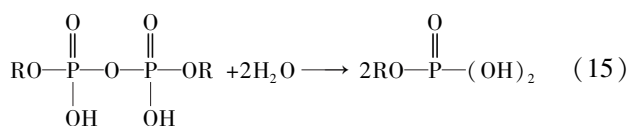
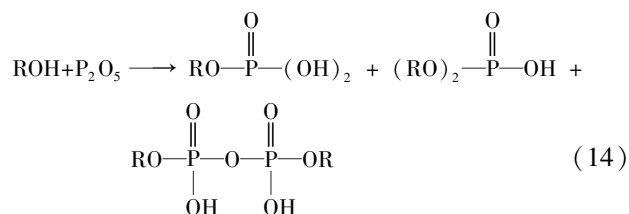


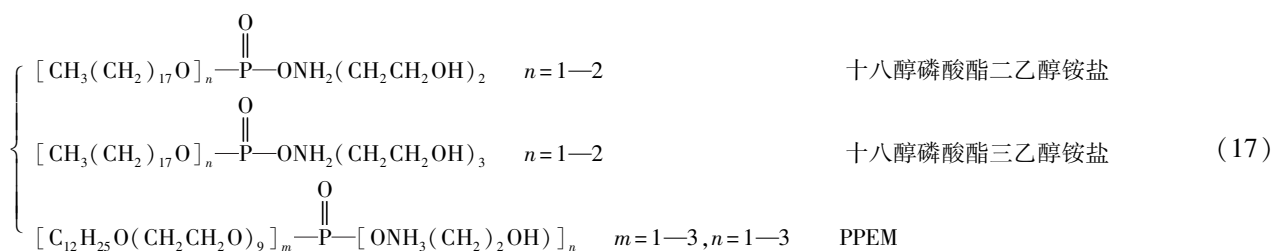
类似的减阻剂还有醇酰胺类<sup>[49]</sup>,其合成反应见(12)和(13)式,得到的产品为淡黄色液体,不溶于水。由于结构中含有羟基,该产品的溶解性良好,在汽油、柴油和乙醇中的溶解度较高。以柴油或乙醇为溶剂,配制成该产品的溶液,在钢片表面能形成很好的光滑减阻膜,填充了钢片表面的凹凸区域及点蚀斑迹,改善了钢片表面形貌。但在室内环道测试中,其减阻效果的持续时间不够理想,最长时间是7天,最短不到1天。



### 2.4 磷酸酯类化合物

磷酸酯类化合物减阻剂产品,如AEO-9磷酸酯铵盐(PPEM)、十八醇磷酸酯铵盐(OPEM)<sup>[40,50-51]</sup>,合成过程见(14)~(16)式,其中R为CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>17</sub>OH或C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>O(CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>O)<sub>9</sub>H。各产品化学结构及名称如(17)式所示。

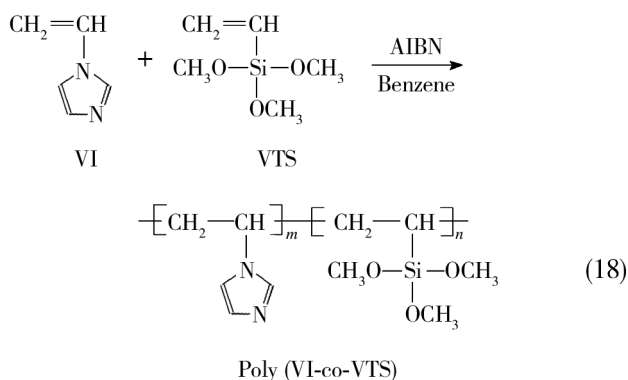




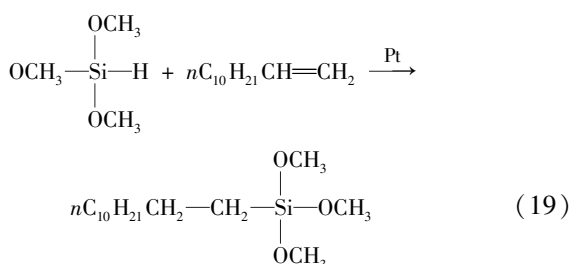
产品十八醇磷酸酯铵盐(OPEM)为白色蜡状固体。经SEM观察可知,成膜后的钢片表面粗糙度明显变小,说明在钢片表面,OPEM具有较好的成膜吸附性能。产品AEO-9磷酸酯铵盐(PPEM)为亮黄色黏稠状液体,极化曲线测试结果表明,合成的磷酸酯铵盐类减阻剂均具有在钢片表面成膜的性能。

## 2.5 聚合物型

此类减阻剂中,典型的产品包括乙烯基硅氧烷与乙烯基咪唑啉共聚物(VI-VTMS)<sup>[37,52]</sup>。在引发剂AIBN存在的条件下,两单体在溶剂苯中发生共聚反应,得到最终高分子产物,其合成过程见(18)式,产品为固体。电化学极化曲线测试中,VI-VTMS在铁电极表面成膜后的容抗弧直径明显变大,表明该产品具有良好的成膜性能。室内环道评价表明,VI-VTMS的减阻率最大可达22.72%。



在铂催化剂存在的条件下,十二烯与三甲氧基硅烷发生反应,生长链的硅氧烷<sup>[53]</sup>,其反应见(19)式。室内环道测试中,通过浸渍法使硅氧烷溶液在管道内壁成膜,成膜1h后,平均减阻率可达6%,有效期>60天。



## 3 结语

天然气减阻剂具有提高输气量、降低摩擦阻力的作用,对管输工艺影响较小,且加注方便,是保障天然气管道,特别是满负荷管道安全运行的有效途径,但并不是适用于所有的天然气管道。由于气候原因,北方等地区对天然气的输送量需要进行季节性调峰,加注减阻剂是很好的方法。化学化工企业追求的重要目标之一是节能降耗,作为大型石油化工企业,中国石化有必要研发并应用天然气减阻剂,确保在输送过程中实现节能降耗的目的。

尽管我国研究机构对天然气减阻剂的开发已近10年,但目前还存在许多问题:

1) 减阻机理方面。减阻剂的减阻机理已有相关的分析和阐述,但尚未形成具有指导意义的系统理论,大多机理问题都借鉴于缓蚀剂机理。

2) 分子结构设计方面。减阻剂发挥作用的关键是极性端的吸附能力,其次为非极性端的柔性。吸附能力和耐久性主要与极性端起吸附作用的原子电负性有关,减阻效果主要与柔性链长度和个数有关。

3) 评价方法方面。由于减阻剂研究的前瞻性,在目前环道测试中,只能应用小口径直管作为测试管道,这种评价方法和分析结果的可靠性尚需验证和改进。

4) 现场应用方面。目前所报道的现场实验均为短周期且小规模实验,其减阻率和有效距离等的评估方法尚未深入分析与研究,而且目前仍没有大口径管道实验的相关报道。

以上问题都急需进一步研究,为此给予几点未来研究工作的建议:

1) 掌握并深入研究减阻机理,这对于合成和施工工艺是极其必要的,是研究减阻剂的前提,包括动力学模拟、分子力学和量子化学计算。

2) 开发复合极性端吸附、多柔性链且链长合适的天然气减阻剂,以改进目前现有产品的缺点,提高减阻增输效果。



3) 对减阻剂性能评价方法进行系统研究,并全面、系统地表征减阻剂的性能。

4) 未来天然气减阻剂要应用于集输管道和大口径长输管道中,应针对大口径管道加注工艺和现场检测与评价开展探讨。

## 参考文献

- [1] 张金岭,张秀杰,鲍旭晨,等. 天然气减阻剂及其减阻机理的研究进展[J]. 油气储运,2010,29(7):481—486.  
ZHANG Jin-ling,ZHANG Xiu-jie,BAO Xu-chen,et al. Research Progress in Natural Gas DRA and Its Drag Reduction Mechanism[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2010,29(7):481—486.
- [2] 张其滨,范云鹏,林竹,等. 天然气管道输送减阻剂研究[J]. 天然气技术,2008,2(1):48—51.  
ZHANG Qi-bin,FAN Yun-peng,LIN Zhu,et al. Research on Drag Reduction Agent for Natural Gas Pipeline[J]. Natural Gas Technology,2008,2(1):48—51.
- [3] 徐吉展,王娜,刘丽,等. 天然气减阻剂减阻机理探讨[J]. 应用化工,2012,41(8):1417—1421.  
XU Ji-zhan,WANG Na,LIU Li,et al. Discussion on Mechanism of Drag Reduction of Natural Gas Drag Reduction Agent[J]. Applied Chemical Industry,2012,41(8):1417—1421.
- [4] 关中原. 我国油气储运相关技术研究新进展[J]. 油气储运,2012,31(1):1—7.  
GUAN Zhong-yuan. New Progress in Relevant Technology Research of Oil & Gas Storage and Transportation in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2012,31(1):1—7.
- [5] 李国平. 油气管道化学添加剂技术[M]. 北京:石油工业出版社,2010.  
LI Guo-ping. Chemical Additive Technology for Oil and Gas Pipeline[M]. Beijing: Petroleum Industry Press,2010.
- [6] 李国平,刘兵,鲍旭晨,等. 天然气管道的减阻与天然气减阻剂[J]. 油气储运,2008,27(3):15—21.  
LI Guo-ping,LIU Bing,BAO Xu-chen. The Drag Reduction of Natural Gas Transmission Pipeline and Drag Reduction Agent of Natural Gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2008,27(3):15—21.
- [7] 叶天旭,王铭浩,李芳,等. 天然气管输减阻剂的研究现状[J]. 应用化工,2010,39(1):104—106.  
YE Tian-xu,WANG Ming-hao,LI Fang,et al. Study on Drag Reduction Agent of Natural Gas[J]. Applied Chemical Industry,2010,39(1):104—106.
- [8] JUBRAN B A,ZURIGAT Y H,GOOSEN M F A. Drag Reducing Agents in Multiphase Flow Pipelines: Recent Trends and Future Needs[J]. Petroleum Science and Technology,2005,23(11/12):1403—1424.
- [9] ABDELSALAM A S. Drag Reduction with Polymers in Gas-Liquid/Liquid-Liquid Flows in Pipes: A Literature Review[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering,2010,2(1):41—48.
- [10] 刘兵,崔涛,李国平,等. 油气管道减阻增输与高聚物应用[J]. 油气储运,2007,26(10):7—14.  
LIU Bing,CUI Tao,LI Guo-ping,et al. Drag Reduction and Throughput Increase of Oil/ Gas Pipeline and the Application of High Polymer[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2007,26(10):7—14.
- [11] FRANK E L. Drag Reduction Method for Gas Pipeline:US,4958653[P]. 1990-09-25.
- [12] PERRIN F X,PAGETTI J. Characterization and Mechanism of Direct Film Formation on a Cu Electrode through Electro-oxidation of 2-Mercaptobenzimidazole[J]. Corrosion Science,1998,40(10):1647—1662.
- [13] LARSON H,LINDHOLM B,SHARP M. Electron Transport in Quaternized Poly(4-vinylpyridine) Films Containing Pentacyanoferrate(II/III) on Electrodes—The Influence of the Binding Type of the Electroactive Complex[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,1992,336(1/2):263—279.
- [14] DEFORIAN F,FEDRIZZI L,ROSSI S,et al. Organic Coating Capacitance Measurement by EIS: Ideal and Actual Trends[J]. Electrochimica Acta,1999,44(24):4243—4249.
- [15] KONG D. Self-assembled Monolayer of a Schiff Base on Au(II/III) Surface: Electrochemistry and Electrochemical STM Study[J]. Electrochimica Acta,2002,48(4):303—309.
- [16] KRYVIN A E P. Electrochemical Studies of Blocking Properties of Solid Tethered Lipid Membranes on Gold[J]. Bioelectrochemistry,2002,56(1/2):179—184.
- [17] CAMPUZANO S,PEDRERO M,MONTMAYOR C,et al. Characterization of Alkanethiol-self-assembled Monolayers-modified Gold Electrodes by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry,2006,586(1):112—121.
- [18] PATOLSKY F,ZAYATS M,KATZ E,et al. Precipitation of an Insoluble Product on Enzyme Monolayer Electrodes for Biosensor Applications: Characterization by Faradaic Impedance Spectroscopy,Cyclic Voltammetry, and Microgravimetric Quartz Crystal Microbalance Analyses[J]. Analytical Chemistry,1999,71(15):3171—3180.
- [19] OIIVARES X O,LIKHANOVA N V,DOMMGUEZ A M A,et al. Surface Analysis of Inhibitor Films Formed by Imi-



- dazolines and Amides on Mild Steel in an Acidic Environment[J]. Applied Surface Science, 2006, 252(6): 2139—2152.
- [20] ZHAO L, TENG H K, YANG Y S, et al. Corrosion Inhibition Approach of Oil Production Systems in Offshore Oilfields[J]. Material Corrosion, 2004, 55(9): 684—688.
- [21] PERRIN F X, PAGETTI J. Characterization and Mechanism of Direct Film Formation on a Cu Electrode through Electro Oxidation of 2-Mercaptobenzimidazole[J]. Corrosion Science, 1998, 40(10): 1647—1662.
- [22] SUBRAMANIAN A, NATESAN M, MURALIDHARAN V S. An Overview: Vapor Phase Corrosion Inhibitions[J]. Corrosion, 2000, 56(2): 144—155.
- [23] ZHANG X Y, WANG F P, HE Y F, et al. Study of the Inhibition Mechanism of Imidazoline Amide on CO<sub>2</sub> Corrosion of Amoco Iron[J]. Corrosion Science, 2001, 43(8): 1417—1431.
- [24] LOPEZ D A, SIMISON S N, SANCHEZ S R. Inhibitors Performance in CO<sub>2</sub> Corrosion EIS Studies on the Interaction between Their Molecular Structure and Steel Microstructure[J]. Corrosion Science, 2005, 47(3): 735—755.
- [25] LIU X Y, CHEN S H, MA H Y. Protection of Iron Corrosion by Stearic Acid and Stearic Imidazoline Self-assembled Monolayers[J]. Applied Surface Science, 2006, 253(2): 814—820.
- [26] 鞠虹, 李焰, 崔海捷. 嘧啶类缓蚀剂对酸性介质中奥氏体不锈钢的缓蚀量化构效影响研究[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 107—110.
- JU Hong, LI Yan, CUI Hai-jie. Effects of Pyrimidine Derivative Corrosion Inhibitors on the Anti-corrosion Quantitative Structure-activity Relationship of Austenitic Stainless Steel in Acidic Media[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 107—110.
- [27] ZHANG D Q, GAO L X. Synergistic Effects Benzotiazole and 8-hydroxyquinoline Combined Inhibitor on Copper Corrosion[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2002, 18(1): 74—78.
- [28] GAO L X, ZHANG D Q, LU Z. Dimmeric-amine Vapor Phase Inhibitor Containing Morpholine Unit[J]. Journal of Materials Protection, 2000, 33(6): 39—41.
- [29] KABALKA G W, ZHOU L L, WANG L, et al. A Microwave-enhanced, Solventless Mannich Condensation of Terminal Alkynes and Secondary Amines with Para-formaldehyde on Cuprous Iodide Doped Alumina[J]. Tetrahedron, 2006, 62(37): 857—867.
- [30] LIN J J, LIN S F. Phase Inversion of Self-aggregating Mannich Amines with Poly(Oxyethylene) Segments[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2003, 258(1): 155—162.
- [31] AHAMAD I, PRASAD R, QURAISHI M A. Adsorption and Inhibitive Properties of Some New Mannich Bases of Isatin Derivatives on Corrosion of Mild Steel in Acidic Media[J]. Corrosion Science, 2010, 52(4): 1472—1481.
- [32] YOGESWARI P, SRIRAM D, KAVYA R, et al. Synthesis and in-vitro Cytotoxicity Evaluation of Gatifloxacin Mannich Bases[J]. Biochemical Pharmacology, 2005, 59(9): 501—510.
- [33] 王铭浩. 天然气管输减阻剂的开发与评价[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- WANG Ming-hao. Development and Evaluation of DRA for Nature Gas Pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010.
- [34] 王甜甜, 马士越, 吴坤坤, 等. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>对曼尼希碱酸化缓蚀剂缓蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(9): 102—107.
- WANG Tian-tian, MA Shi-yue, WU Kun-kun, et al. Influence of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> on the Inhibition Performance of Compounded Mannich Base Hydrochloric Acid Corrosion Inhibitor[J]. Surface Technology, 2015, 44(9): 102—107.
- [35] 赵宁. 天然气减阻剂的合成及雾化减阻性能测试装置的设计[D]. 山东: 山东大学, 2007.
- ZHAO Ning. Synthesis of DRA for Gas and Device of the Atomization and Spray[D]. Shandong: Shandong University, 2007.
- [36] 鲍旭晨, 张金岭, 张秀杰, 等. BIB 天然气减阻剂研制与应用[J]. 油气储运, 2010, 29(2): 113—117.
- BAO Xu-chen, ZHANG Jin-ling, ZHANG Xiu-jie, et al. Synthesis and Application of BIB Natural Gas DRA[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(2): 113—117.
- [37] 邢文国. 天然气减阻剂的研制及其减阻性能研究[D]. 山东: 山东大学, 2010.
- XING Wen-guo. Development of Nature Gas DRAs and Studying on the Drag Reduction Performance[D]. Shandong: Shandong University, 2010.
- [38] 刘然克, 王立贤, 刘智勇, 等. 咪唑啉类缓蚀剂对 P110 钢在 CO<sub>2</sub> 注入井环空环境中应力腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(3): 25—30.
- LIU Ran-ke, WANG Li-xian, LIU Zhi-yong, et al. Effect of Imidazoline Corrosion Inhibitor on Stress Corrosion Cracking Behavior of P110 Steel in Simulated Annulus Environment in CO<sub>2</sub> Injection Wells[J]. Surface Technology, 2015, 44(3): 25—30.
- [39] 申丽霞. 天然气减阻剂的合成及减阻性能测试装置的设计[D]. 山东: 山东大学, 2006.
- SHEN Li-xia. Synthesis of DRA for Gas and Device of Drag Reduction Performance[D]. Shandong: Shandong University, 2006.

- [40] 张梦. 天然气减阻剂的开发及其减阻性能评价[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.  
ZHANG Meng. Development and Evaluation of Drag Reduction Agents for Natural Gas Pipeline[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [41] 张雷. 天然气减阻剂的研制及减阻性能测试[D]. 山东: 山东大学, 2009.  
ZHANG Lei. The Development of Nature Gas DRAs and Drag Reduction Performance Test[D]. Shandong: Shandong University, 2009.
- [42] 邢文国, 冯维春, 张长桥, 等. 硬脂酸咪唑啉在天然气输送管道减阻成膜性能的研究[J]. 材料工程, 2011(7): 44—48.  
XING Wen-guo, FENG Wei-chun, ZHANG Chang-qiao, et al. Drag Reduction and Film Forming Property of Stearic Imidazoline on Natural Gas Pipeline[J]. Material Engineering, 2011(7): 44—48.
- [43] 张志恒, 艾慕阳, 李国平, 等. 咪唑啉类输气管道减阻剂及其制备方法: 中国, 101575496A[P]. 2008-05-09.  
ZHANG Zhi-heng, AI Mu-yang, LI Guo-ping, et al. Imidazoline of Gas Pipeline Drag Reduction Agent and Preparation Method thereof: China, 101575496A[P]. 2008-05-09.
- [44] 刘瑞斌, 陈慧玉, 王慧龙, 等. 烷基咪唑啉中间体合成的最佳反应条件的研究[J]. 渤海大学学报, 2004, 25(3): 213—216.  
LIU Rui-bin, CHEN Hui-yu, WANG Hui-long, et al. Best Reaction Condition for Synthesis of Alkylimidazoline Compounds[J]. Journal of Bohai University, 2004, 25(3): 213—216.
- [45] 李春漫, 刘兵, 鲍旭晨, 等. 一种气体管道减阻剂及其制备方法: 中国, 101328441A[P]. 2007-06-20.  
LI Chun-man, LIU Bing, BAO Xu-chen, et al. A Method of Gas Pipeline Drag Reducer and Its Preparation: China, 101328441A[P]. 2007-06-20.
- [46] 李国平, 徐海红, 刘兵, 等. 一种气体管道减阻剂组合物及其制备方法: 中国, 101328443A[P]. 2007-06-20.  
LI Guo-ping, XU Hai-hong, LIU Bing, et al. Composition and Preparation Method of a Gas Pipeline Drag Reducer: China, 101328443A[P]. 2007-06-20.
- [47] 李峰, 邢文国, 张金岭, 等. 基于巯基三唑化合物的复配天然气减阻剂性能研究[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 87—91.  
LI Feng, XING Wen-guo, ZHANG Jin-ling. Drag Reduction Performance of a Combinational Natural Gas Drag Reduction Agent (DRA) Based on Mercapto-triazole Compound[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 87—91.
- [48] 刘兵, 李国平, 李春漫, 等. 一种输气管道减阻剂及其制备方法: 中国, 101329011A[P]. 2007-06-20.  
LIU Bing, LI Guo-ping, LI Chun-man, et al. A Method of Reducing Drag Reducer and Its Preparing Method for Gas Transmission Pipeline: China, 101329011A[P]. 2007-06-20.
- [49] 许超. 天然气减阻剂的合成及减阻性能测试装置的改进与应用[D]. 山东: 山东大学, 2008.  
XU Chao. Synthesis of Natural Gas DRAs and Improvement and Application of Drag-reducing Test Loop[D]. Shandong: Shandong University, 2008.
- [50] 叶天旭, 王铭浩, 曹云, 等. 基于十八醇磷酸酯单乙醇铵盐的天然气减阻剂室内评价[J]. 天然气工业, 2010, 30(11): 92—96.  
YE Tian-xu, WANG Ming-hao, CAO Yun, et al. Laboratory Evaluation of a Natural Gas Drag Reduction Agent (DRA) Based on Octadecanol Phosphate Ester Monoethanolammonium[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(11): 92—96.
- [51] 叶天旭, 吕宇玲, 罗小明, 等. 一种天然气管道减阻剂及其制备方法: 中国, 102443022A[P]. 2011-08-25.  
YE Tian-xu, LYU Yu-ling, LUO Xiao-ming, et al. A Method of Drag Reduction Agent for Natural Gas Pipeline and Its Preparation: China, 102443022A[P]. 2011-08-25.
- [52] HYUNCHEOL K, JYONGSIK J. Synthesis and Characterization of Vinyl Silane Modified Imidazole Copolymer as a Novel Corrosion Inhibitor[J]. Polymer Bulletin, 1997, 38(3): 249—256.
- [53] 郭海峰, 张志恒, 李春漫, 等. 一种天然气管道防腐和减阻的化学添加剂及其制备方法: 中国, 102040908A[P]. 2010-12-23.  
GUO Hai-feng, ZHANG Zhi-heng, LI Chun-man, et al. Chemical Additives of Inhibition and Drag Reduction and Its Preparation for Natural Gas Pipeline: China, 102040908A[P]. 2010-12-23.