

文章编号:1009-9603(2022)03-0146-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202110021

# 梳形两亲渗透降黏驱油剂的制备及性能评价

郑万刚<sup>1,2,3</sup>, 束青林<sup>4</sup>, 曹嫣嫔<sup>1,2</sup>, 管雪倩<sup>1,2</sup>, 于田田<sup>1,2</sup>, 张仲平<sup>1,2</sup>, 初伟<sup>1,2</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院,山东东营 257000; 2.山东省稠油开采技术重点实验室,山东东营 257000; 3.中国石化胜利石油管理局有限公司博士后科研工作站,山东东营 257000; 4.中国石化胜利油田分公司,山东东营 257000)

**摘要:**稠油油藏经过多个周期的蒸汽吞吐开发后,油气比大幅下降,无效低效井增多,经济效益变差,亟需探索多轮次吞吐后稠油转型开发技术。针对现有化学冷采助剂无法满足现场油藏低动力降黏驱油要求的问题,合成了一种梳形两亲渗透降黏驱油剂(PDE-1),通过单因素实验研究了引发剂用量、单体配比等聚合条件对PDE-1性能的影响。采用光学显微镜、微流控等技术手段对PDE-1的渗透解聚性能、润湿性能、降黏性能和静态洗油性能开展分析研究。结果表明,合成PDE-1时最佳单体配比丙烯酸胺:丙烯酸钠:功能单体BBAM:含醚键单体为75:20:1.5:3.5,引发剂用量为0.3%,聚合温度为40℃,单体总质量分数为25%,反应时间为6h。所合成的PDE-1在储层低动力条件下可自发渗透解聚稠油;能改变毛细管内的岩石润湿性,变储层毛细管阻力为驱油动力;在质量浓度为1500mg/L时,PDE-1对普通稠油的降黏率达97.5%;质量浓度为500mg/L时,对油砂的洗油率达58.7%,具有优异的降黏性能和洗油性能。

**关键词:**共聚物;渗透解聚;降黏;润湿改性;稠油油藏

中图分类号:TE357.46

文献标识码:A

## Preparation and performance evaluation of comb-shaped amphiphilic permeable agents for viscosity reduction and oil displacement

ZHENG Wangang<sup>1,2,3</sup>, SHU Qinglin<sup>4</sup>, CAO Yanbin<sup>1,2</sup>, GUAN Xueqian<sup>1,2</sup>,

YU Tiantian<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhongping<sup>1,2</sup>, CHU Wei<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Petroleum Engineering and Technology, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Shandong Key Laboratory of Heavy Oil Production Technology, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 3. Postdoctoral Scientific Research Work Station, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 4. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** After several cycles of steam huff and puff development, the oil-steam ratio of heavy oil reservoirs decreases significantly and the number of ineffective and low effective wells increases, which causes worse economic benefits. It is urgent to explore the transformation development technology of heavy oil after multiple rounds of huff and puff. As the existing chemical cold production additives cannot meet the requirements of viscosity reduction and oil displacement under a low dynamic in field, a comb-shaped amphiphilic permeable agent PDE-1 for viscosity reduction and oil displacement was synthesized in this paper. Specifically, the effects of polymerization conditions such as the initiator dosage, and monomer ratio on the performance of PDE-1 were investigated by single-factor experiments. In addition, the technical means such as the optical microscope and microfluidics were applied to analyze the performance of PDE-1, including the penetration and depolymerization, wettability, viscosity reduction, and static oil washing. The results revealed that for the synthesis of PDE-1, the optimal monomer ratio should satisfy that acrylamide: sodium acrylate: functional monomer BBAM: monomer contain-

收稿日期:2022-03-09。

作者简介:郑万刚(1987—),男,山东聊城人,副研究员,博士,从事油田化学品研发工作。E-mail:zhengwangang.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家重点研发计划项目“稠油化学复合冷采基础研究与工业示范”(2018YFA0702400)。

ing ether bonds equals 75:20:1.5:3.5, with the initiator dosage of 0.3%, polymerization temperature of 40 °C, total monomer mass fraction of 25%, and reaction time of 6 h. The synthesized PDE-1 can spontaneously permeate and depolymerize heavy oil under a low dynamic in reservoirs, change the rock wettability in the capillaries, and turn the reservoir capillary resistance into oil displacement power. At the mass concentration of 1 500 mg/L, the viscosity reduction rate of PDE-1 in ordinary heavy oil is 97.5%, and at 500 mg/L, the oil washing rate of oil sand reaches 58.7%, which indicates that PDE-1 has excellent viscosity reduction and oil washing performance.

**Key words:** copolymer; permeation and depolymerization; viscosity reduction; wetting modification; heavy oil reservoirs

稠油油藏化学冷采技术是在水驱开发的基础上,利用化学冷采助剂使深层低渗透、浅薄层和超深层稠油有效动用,从而提高其采收率<sup>[1-3]</sup>。该技术因具有工艺简单、需要设备少和便于生产管理等优势而被广泛应用<sup>[4]</sup>。目前,美国、加拿大等均将该技术进行商业化应用<sup>[5-6]</sup>。中国辽河、新疆、胜利等油田的部分稠油油藏区块也相继开展了试验应用,并取得一定的效果<sup>[7-9]</sup>。已进行矿场试验的化学药剂体系有解聚降黏剂<sup>[10]</sup>、自扩散降黏剂<sup>[11]</sup>、乳液降黏体系<sup>[12]</sup>等,具有提高油井产量、降低生产成本的特点。研究表明,应用于稠油油藏化学冷采的几种化学剂体系性能较好,但均未规模化应用,主要原因是化学剂无法同时兼具降黏、润湿等关键性能;化学剂在稠油油藏中适应性较差,特别是在油藏深部动力弱的条件下难以乳化剥离原油。为此,笔者研究出一种梳形两亲渗透降黏的驱油剂(属于高分子型表面活性剂),可以在微动力下解聚分散稠油和改变储层润湿性。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料和仪器

**实验材料** 实验材料主要包括:溴化钾,分析纯,由国药集团化学试剂有限公司提供;丙烯酰胺(99.9%)、过硫酸钾(AR)、氢氧化钠(99.9%),由天津西恩试剂有限公司提供;功能单体BBAM、含醚键单体、引发剂DMAPN,由实验室自制;滨南油田某区块地层水,矿化度为23 583.65 mg/L, Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ba<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Cl<sup>-</sup>的质量浓度分别为8 233, 457, 232, 33.2, 1 372.95, 9.61和13 245.8 mg/L;实验用原油为胜利油区滨南油田某区块原油,油藏温度为50 °C,该原油乳化含水率为12.4%,50 °C时的黏度为7 250 mPa·s,属于普通稠油。原油饱和烃、芳香烃、胶质、沥青质含量分别为35.19%, 31.91%, 26.11%, 6.79%,原油酸值为0.08 mgKOH/g。

**实验仪器** 实验仪器主要包括:B-220恒温水浴锅,由上海亚荣生化仪器厂生产;84-B磁力搅拌器,由山东郓城华营电器有限公司生产;ZKXF真空

干燥箱,由上海树立仪器仪表有限公司生产;RE52GS旋转蒸发器,由上海亚荣生化仪器厂生产;NEXUS670红外光谱仪,由美国Thermo Nicolet公司生产;Axioskop-40光学显微镜,由德国Carl Zeiss公司生产;DV-III黏度计,由美国Brookfield公司生产;TX500C旋转滴界面张力仪,由美国彪维公司生产;Tracker型界面流变仪,由法国Teclis公司生产。

### 1.2 实验方法

**PDE-1的制备** 制备步骤主要包括:①将丙烯酰胺、丙烯酸钠、功能单体BBAM、含醚键单体以一定摩尔比分别加入500 mL的烧瓶中。②向4口烧瓶中加入去离子水和一定量的氢氧化钠溶液,并放入水浴锅中加热;同时,通入氮气吹扫30 min。③将一定量的引发剂溶于水,分别加入烧瓶中,在一定温度下搅拌引发聚合反应;120 min后,加入与引发剂同等质量的阻聚剂对二苯酚。④将所得产物用丙酮清洗2次,然后用剪切机剪切为小块。⑤将小块产物放入真空干燥箱进行干燥,得到白色固体,放入粉碎机内粉碎成粉末,最后筛分出60~80目的粉末,即为PDE-1(图1)。

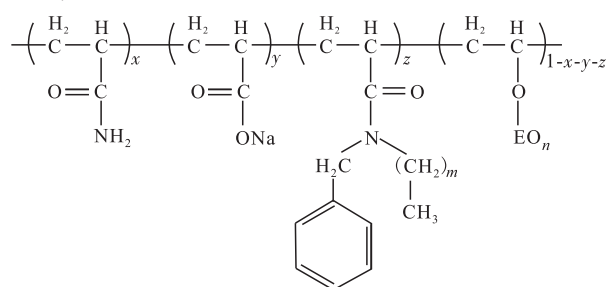


图1 梳形两亲渗透降黏驱油剂PDE-1的分子结构

Fig.1 Molecular structure of comb-shaped amphiphilic permeable agent PDE-1 for viscosity reduction and oil displacement

合成PDE-1的反应产率计算公式为:

$$y = \frac{m'}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

**镜检分析** 采用地层水配制质量浓度为1 500 mg/L的PDE-1水溶液,将水溶液与原油以质量比为2:1混合,充分搅拌均匀。用滴管将混合体系转移至载玻片上,将载玻片放到光学显微镜下,设置放大倍数为50倍;观察油滴在溶液中的分散状态,并

拍照。

**润湿性能分析** ①静态润湿角测试。取一片云母片将其表面清洗干净后,使用胶带将其初始表面除去,使其新鲜的表面裸露出来,涂覆上一层原油,静置24 h。另取一片云母片重复以上操作,静置24 h后,于稠油表面滴加3滴质量浓度为1 500 mg/L的PDE-1水溶液,并静置12 h。采用界面流变仪测量蒸馏水在云母片上的接触角。②动态润湿角测试。构建动态润湿角测试模型,该模型由2条长供液通道和7条相互平行的微通道构成,微通道的长、宽、深分别为40,15,2  $\mu\text{m}$ 。在长供液通道两端分别注入PDE-1体系与原油,保持两端的压差为0,观察液面变化并拍照。

**降黏性能分析** 采用地层水配制质量浓度为1 500 mg/L的PDE-1水溶液,参照稠油油藏降黏驱油剂技术要求<sup>[13]</sup>,在温度为50  $^{\circ}\text{C}$ 、剪切速率为50  $\text{s}^{-1}$ 的条件下,采用黏度计进行黏度测定并计算PDE-1的降黏率。

**静态洗油性能分析** 实验步骤主要包括:①将40~60目地层砂与原油按质量比为4:1混合,放入50  $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱中老化7 d,每天搅拌1次,使油砂混合均匀。②用地层水配制质量浓度为500 mg/L的PDE-1水溶液100 g,在搅拌机以上以300 r/min的转速搅拌30 min后待测。③称取老化好的油砂约5 g放至100 mL锥形瓶中,称重得油砂和锥形瓶总质量( $m_1$ ),精确至0.001 g。④向锥形瓶中加入②中配制好的PDE-1水溶液50 g,充分混合后放到恒温箱中,设置温度为50  $^{\circ}\text{C}$ ,静置24 h。⑤将静置后的锥形瓶中漂浮的以及瓶壁上黏附的原油均用干净的棉纱蘸出,并倒出PDE-1样品溶液,将锥形瓶放在105  $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘至恒重,称重得清洗后油砂和锥形瓶总质量( $m_2$ ),精确至0.001 g。⑥使用60~90  $^{\circ}\text{C}$ 沸程的石油醚对烘干后的样品进行原油洗脱,直至石油醚无色。将洗脱尽原油的锥形瓶置于120  $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘至恒重,称重得地层砂和锥形瓶总质量( $m_3$ ),精确至0.001 g。⑦每个样品做2个平行样,取算术平均值作为测定结果。当单个值与算术平均值偏差大于5%时,需要重新取样测定。

洗油率的计算公式为:

$$\sigma = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (2)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 PDE-1合成条件优化

**引发剂类型** 在聚合过程中,选择使用过硫酸

钾(KPS)与实验室自制的引发剂(DMAPA)构成的胺类复合引发体系。该复合引发体系反应活化能低,自由基释放速度平稳,体系内自由基浓度保持低,引发效率高。在PDE-1的合成过程中,通过对PDE-1降黏率和反应产率的评价确定合成PDE-1的最佳反应条件。固定KPS/DMAPN质量比为2:1,由复合引发剂质量分数对PDE-1降黏率及聚合物相对分子质量的影响(图2)可见,随着复合引发剂质量分数的增加,所合成的PDE-1聚合物相对分子质量先急剧升高,随后缓慢降落,在复合引发剂质量分数为0.15%~0.3%时,其聚合程度最高,聚合物相对分子质量在 $1\ 270 \times 10^4 \sim 1\ 330 \times 10^4$ ,继续增加复合引发剂质量分数,聚合物相对分子质量反而降低;而随着复合引发剂质量分数的升高,合成的PDE-1降黏率先升高后降低,在复合引发剂质量分数为0.3%时达到最大,此时降黏率为95%。

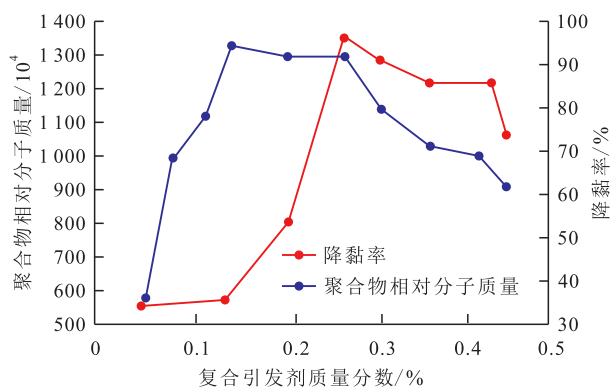


图2 复合引发剂质量分数对PDE-1降黏率及聚合物相对分子质量的影响

Fig.2 Effect of mass fraction of compound initiators on viscosity reduction rate and relative molecular mass of PDE-1

KPS/DMAPN复合引发剂质量分数小于等于0.15%时,分解产生的活性自由基浓度较低,链增长反应速度较慢,降低了PDE-1的相对分子质量。随着复合引发剂质量分数增大,KPS易与DMAPN作用形成自由基,自由基浓度增加,与聚合单体的碰撞率增加,主链长度增加,PDE-1降黏率增大。复合引发剂质量分数大于等于0.4%时,体系中自由基浓度过高,增加链终止和转移速率,降低了PDE-1黏均分子量;且复合引发剂质量分数大,聚合速率快,过程大量产热,造成体系内局部KPS形成自由基,进一步扩大了体系自由基量。因此,在合成PDE-1过程中,KPS/DMAPN复合引发剂最佳质量分数为0.3%。

**单体配比** 通过调节丙烯酰胺、丙烯酸钠、功能单体BBAM、含醚键单体等单体的配比,可控制



PDE-1 分子结构中极性基团、苯环和长链烷基数量,进而得到性能最佳的 PDE-1。固定丙烯酸胺与丙烯酸纳单体的摩尔比为 75:20,改变功能单体 BBAM 与含醚键单体的摩尔比,实验结果如表 1 所示。随着功能单体 BBAM 与含醚键单体摩尔比的降低,所合成的 PDE-1 分子结构中醚键结构越来越多,对应的 PDE-1 降黏率先升高后降低,在摩尔比为 1.5:3.5 时达到最大,此时聚合反应生成的聚合物黏均分子量也达到最大。因此,确定单体配比丙烯酸胺:丙烯酸纳:功能单体 BBAM:含醚键单体为 75:20:1.5:3.5。

表 1 单体比对 PDE-1 降黏率及黏均分子量的影响  
Table1 Effect of monomer ratio on viscosity reduction rate and viscosity average molecular mass of PDE-1

摩尔比 (功能单体 BBAM:含醚键单体)	降黏率/%	黏均分子量/10 <sup>4</sup>
2.5:2.5	85	639
2.0:3.0	87	1 085
1.5:3.5	98	1 380
1.0:4.0	80	942
0.5:4.5	65	520

单体质量分数 从 4 种单体的总质量分数对 PDE-1 降黏率及残余单体含量的影响(图 3)可以看出:随着单体总质量分数的增加,所合成的 PDE-1 降黏率先升高后降低。当单体总质量分数过低时,反应体系中单体分子相互接触的机率较小,在复合引发剂作用下,聚合物分子链的增长速率较为缓慢,不利于相对分子质量的提高;当单体总质量分数过高时,共聚反应产生的热量得不到及时扩散,导致链终止速率增大,甚至可能会发生局部爆聚的现象,使聚合物残余单体含量升高,PDE-1 降黏性能下降。通过实验结果认为,单体总质量分数以 25%

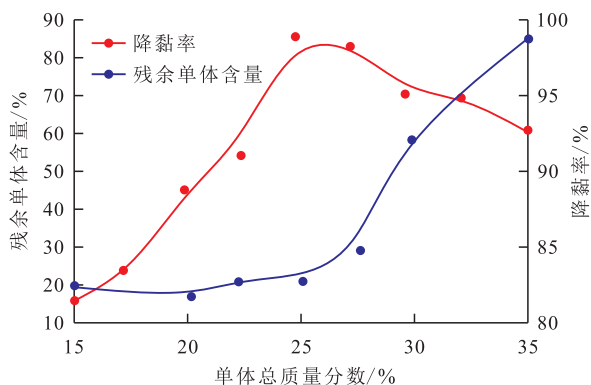


图 3 单体总质量分数对 PDE-1 降黏率及残余单体含量的影响

Fig.3 Effect of total monomer mass fraction on viscosity reduction rate and residual monomer content of PDE-1

为宜。

反应温度 从反应温度对 PDE-1 降黏率及残余单体含量的影响(图 4)可以看出:较低的反应温度有利于降低合成的 PDE-1 残余单体含量,使聚合更完全,但相应的复合引发剂的分解速率较低,反应时间较长,甚至造成反应难以进行;提高反应温度,有利于复合引发剂分解速率增加,生成的自由基浓度增大,但链终止的反应速率也相应提高,过高的温度会影响驱油剂的降黏性能。因此,综合考虑反应温度对 PDE-1 降黏率和残余单体含量的影响,确定反应温度以 40 °C 为宜。

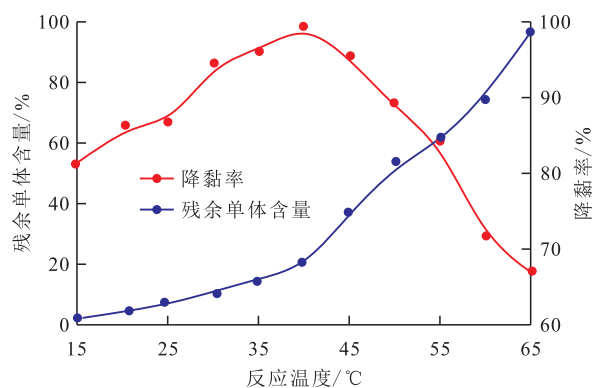


图 4 反应温度对 PDE-1 降黏率及残余单体含量的影响

Fig.4 Effect of reaction temperature on viscosity reduction rate and residual monomer content of PDE-1

反应时间 从反应时间对 PDE-1 残余单体含量及 2 000 mg/L 条件下 50 °C 时 PDE-1 表观黏度的影响(图 5)可以看出:随着反应时间的增加,聚合反应的表观黏度呈先急剧增长而后缓慢下降趋势。而残余单体含量则随着反应时间的延长,一直呈降低趋势,说明随着反应时间的延长,丙烯酸胺、丙烯酸纳、功能单体 BBAM、含醚键单体更倾向于相互聚合。考虑到节能要求,推荐反应时间为 6 h。

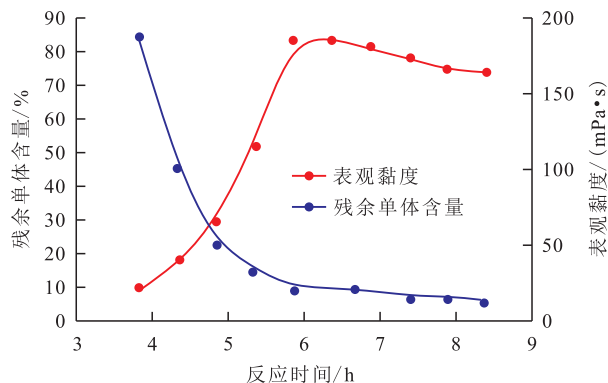


图 5 反应时间对 PDE-1 表观黏度及残余单体含量的影响

Fig.5 Effect of reaction time on apparent viscosity and residual monomer content of PDE-1

## 2.2 PDE-1 性能评价

渗透解聚性能 PDE-1 由于具有疏水基团表

现出一定的两亲性,会使其具有较高的界面活性,0.1%PDE-1水溶液可将稠油与水的界面张力降低至0.04 mN/m。因此,PDE-1可自发乳化分散稠油,在静态条件下,稠油可分散成油膜,覆盖在药剂表面(图6)。

油滴在PDE-1体系中可自发快速扩散,沥青质聚集体解聚分散,破坏稠油的聚集结构,在静置10~20 min后实现无动力渗透解聚。该渗透解聚性能与PDE-1的分子结构有关。研究表明,稠油胶体结构包括沥青质之间形成的内核以及外围包裹的胶质、少量沥青质和环烷烃。其中,胶体核中的沥青质分子间主要以 $\pi-\pi$ 强作用力为主,且晶核较小,无需破坏其内部作用力;晶核外层的胶质、沥青质之间主要以C形成的氢键或范德华力为主,作用力较小<sup>[14]</sup>。PDE-1疏水基为支化碳链并嵌套苯环,易于插入稠油内部,有效分散沥青质聚集体来破坏蜡晶

成核,强化与原油亲和性;此外,疏水基团引入强电负性元素N和O,破坏稠油内部氢键,增大诱导沥青质聚集体的空间无序度,实现稠油解聚<sup>[15]</sup>。同时,体系分子上引入的亲水基团伸展在油水界面外层,可通过自发吸附水分子,在油滴外层形成一层水膜,变油与油之间的摩擦力为水与水之间的摩擦力,实现大幅降黏。通过分析可知,解聚过程和乳化过程均为自发作用,所需外力作用较小。

润湿性能 PDE-1能有效地改变固体表面的润湿性,其接触角的变化如图7所示。当蒸馏水与稠油覆盖的云母片表面接触后,接触角为116.5°,此时被稠油覆盖的云母片表面是油湿性;向涂覆上一层稠油的云母片表面滴加PDE-1后,接触角转变为37.5°,此时的云母片转变为水湿性,说明经过PDE-1处理后,稠油表面的润湿性已由油湿性转变为水湿性。

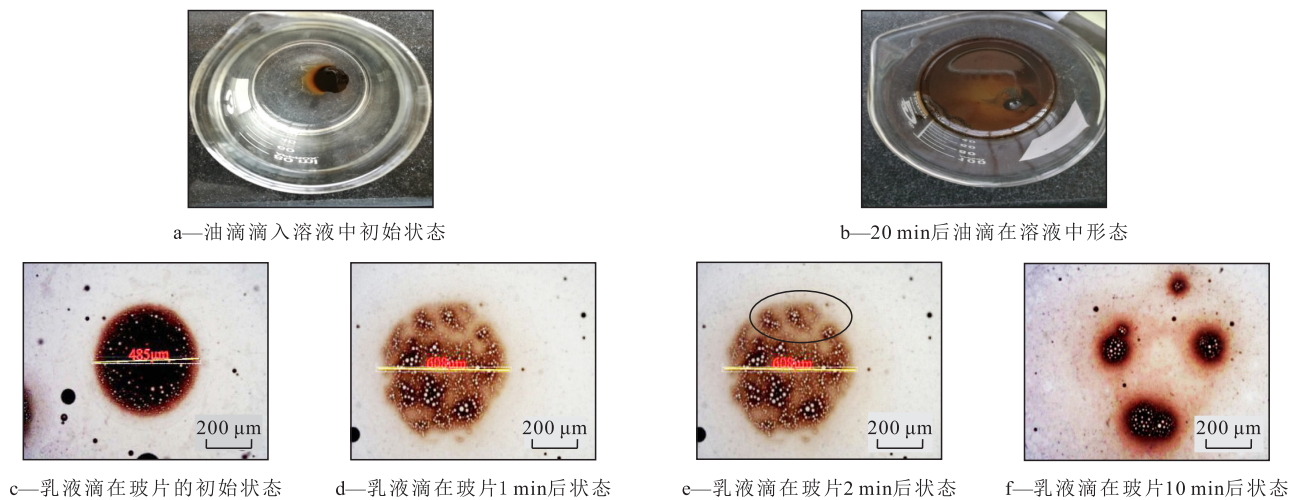


图6 PDE-1溶液解聚稠油照片和镜检分析

Fig.6 Images and microscopic analysis of PDE-1 solution depolymerizing heavy oil

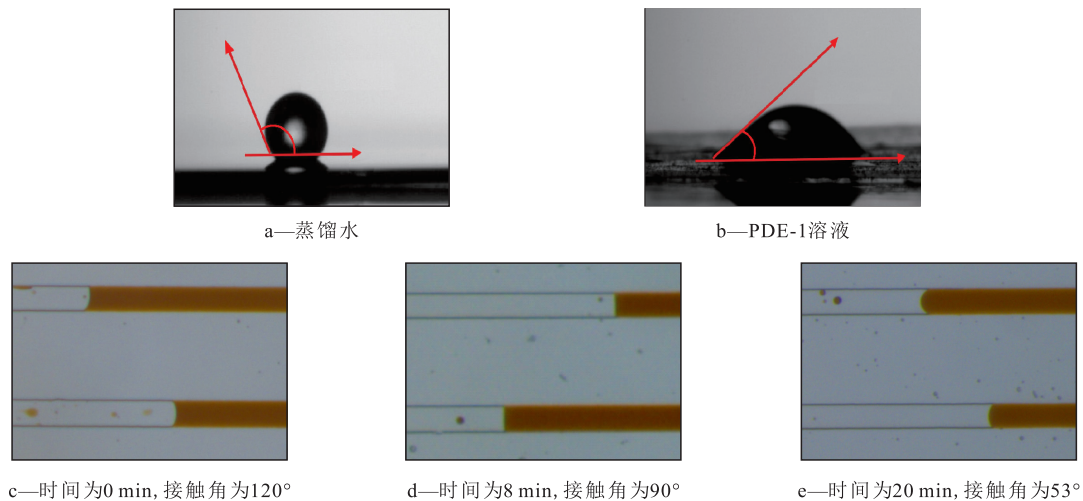


图7 蒸馏水与稠油覆盖的云母片、稠油与水的动态接触角

Fig.7 Dynamic contact angle between heavy oil and water as well as between distilled water and mica sheets covered with heavy oil

为研究 PDE-1 体系在油藏条件下能否改变储层润湿性,设计了压力平衡的毛细管动态实验,采用动态润湿角测试方法检验 PDE-1 体系在油藏条件下的润湿改变性能。根据图 7 可知,发生润湿改性后,油水接触角从 120°降低至 53°,降低了驱油阻力,改变油相流态。该润湿改性功能使得 PDE-1 能吸附在岩石表面改变其润湿性能(图 8),在岩石壁面与油相之间形成水膜,将原本被束缚住的油相从壁面上剥离下来,实现剩余油有效动用。为了降低表面自由能,油相自动收缩呈近球状流态。PDE-1 体系的润湿改性功能具有明显的时间依赖性,焖井静置能够促进药剂与油相的相互作用,改变油相赋存状态。

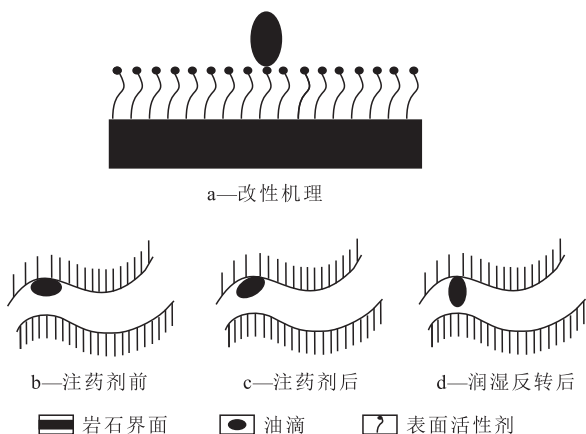


图 8 PDE-1 的润湿改性机理示意

Fig.8 Schematic diagram of PDE-1 wetting modification mechanism

**降黏性能** 将 PDE-1 水溶液与原油以质量比为 3:7 混合,测定其降黏率,并与阴离子型和非离子型降黏剂进行降黏效果对比。实验结果(图 9)表明:与阴离子型和非离子型降黏剂相比,PDE-1 体系降黏效果更好,在质量浓度为 100 mg/L 时可有效降低原油黏度 90% 以上,在质量浓度提高到 500 mg/

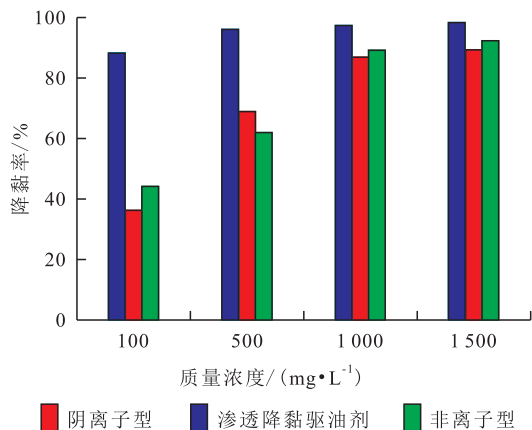


图 9 不同降黏剂对稠油降黏效果评价结果

Fig.9 Evaluation results of viscosity reduction effect of different viscosity reducers on heavy oil

L 时,可降低原油黏度 95% 以上。在低质量浓度下,PDE-1 水溶液与油相能够形成低界面张力体系,在搅拌作用下 PDE-1 吸附在油水界面上,形成较为稳定的界面膜,因此形成低黏度的乳化分散体系,达到降低原油黏度的作用。在多孔介质流动过程中,受外界扰动影响,同样形成低黏度的乳化分散体系,受表面自由能的影响,油相普遍以球状流态存在,流动性较强,可有效提高采收率。

**静态洗油性能** 基于 PDE-1 的自发解聚分散稠油能力,测定 PDE-1 在静态条件下的洗油能力,并与水、非离子型表面活性剂和阴离子型表面活性剂进行不同质量浓度条件下的洗油效果对比(表 2)。水的静态洗油率最低,阴、非离子型表面活性剂在较低质量浓度下的静态洗油率不足 30%,当质量浓度达到 5 000 mg/L 时,其洗油率才能达到 35% 以上。和水、常规表面活性剂体系相比,PDE-1 体系能够在 500 mg/L 条件下实现高效洗油,对稠油油砂的静态洗油率大于 50%,而增加质量浓度其静态洗油率反而降低,原因是 PDE-1 溶液的黏度影响其与油、岩石界面的作用。

表 2 静态条件下不同类型降黏剂的洗油率结果  
Table2 Oil washing rates of different viscosity reducers under static conditions

降黏剂类型	质量浓度 / (mg·L <sup>-1</sup> )	静态洗油率 / %
水		13.5
阴离子型	1 000	23.5
	3 000	32.1
	5 000	42.4
非离子型	1 000	13.5
	3 000	29.6
	5 000	36.8
渗透降黏驱油剂	500	57.8
	1 000	45.6
	1 500	36.4

### 3 结论

梳形两亲渗透降黏驱油剂 PDE-1 是一种由丙烯酰胺、丙烯酸钠、功能单体 BBAM 和含醚键单体通过聚合反应生成的多元共聚物型表面活性剂。通过对引发剂类型、单体配比、单体总质量分数、反应温度和反应时间等聚合条件的优化,形成最优反应条件:单体配比为 75:20:1.5:3.5,0.3%KPS/DMAPN 复合引发体系,聚合温度为 40 ℃,单体总质量分数为 25%,反应时间为 6 h。



PDE-1体系具有优异的解聚和乳化稠油作用,可通过破坏稠油内部弱氢键作用方式解除稠油内聚力,通过亲水基的水化作用实现乳化,大幅降低稠油黏度;其良好的界面吸附改性作用,变储层内油湿为水湿,使得油相与壁面的黏附功大幅降低,实现剥离稠油作用;在质量浓度为500 mg/L、搅拌速率为50 r/min条件下即可使普通稠油黏度降低95%以上;在静态条件下其洗油率明显高于市场上的非离子型和阴离子型表面活性剂,洗油率达到50%以上。基于上述的渗透解聚乳化能力、润湿改性能力和静态洗油能力可以预见,PDE-1体系在稠油转型开发技术领域将发挥重要的应用技术潜能。

### 符号解释

- $m_0$ ——加入单体的总质量, g;  
 $m_1$ ——洗油前锥形瓶与油砂的总质量, g;  
 $m_2$ ——洗油后锥形瓶与油砂的总质量, g;  
 $m_3$ ——锥形瓶与洗净后地层砂的总质量, g;  
 $m'$ ——所得白色固体粉末质量, g;  
 $y$ ——合成PDE-1的反应产率, %;  
 $\sigma$ ——洗油率, %。

### 参考文献

- [1] WASSMUTH F R, GREEN K, HODGINS L, et al. Polymer flood technology for heavy oil recovery[C]. Alberta: SPE Canadian International Petroleum Conference, 2007.
- [2] 周凤山, 吴瑾光. 稠油化学降粘技术研究进展[J]. 油田化学, 2001, 18(3): 268-272.  
 ZHOU Fengshan, WU Jinguang. Advances in chemical viscosity-reducing methods and techniques for viscous crude oils [J]. Oilfield Chemistry, 2001, 18(3): 268-272.
- [3] 付亚荣, 马永忠, 刘春平, 等. 稠油冷采地层原油降粘剂: CN 102604618B[P]. 2013-09-04.  
 FU Yarong, MA Yongzhong, LIU Chunping, et al. Viscosity reducer for heavy oil cold recovery formation: CN 102604618B [P]. 2013-09-04.
- [4] 葛际江, 张贵才, 蒋平, 等. 驱油用表面活性剂的发展[J]. 油田化学, 2007, 24(3): 287-292.  
 GE Jijiang, ZHANG Guicai, JIANG Ping, et al. Development of surfactants as chemicals for EOR [J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(3): 287-292.
- [5] RAFAEL D S, JOSE F G. Emulsion flooding of viscous oil reservoirs[C]. SPE Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME, Nevada, 1973.
- [6] THOMAS S, SCOUJAR J R, VERKOCZY B, et al. Chemical methods for heavy oil recovery [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 1999, 40(3): 99-103.
- [7] 吴本芳, 沈本贤, 杨允明, 等. 辽河超稠油乳化降粘研究[J]. 油田化学, 2003, 20(4): 377-379.
- WU Benfang, SHEN Benxian, YANG Yunming, et al. A study on viscosity reduction of Liaohe super-heavy crude oils through emulsification in water [J]. Oilfield Chemistry, 2003, 20(4): 377-379.
- [8] 魏三林, 李晓辉, 尹玉川, 等. 吐哈油田稠油井筒化学降粘的配方研究及室内评价[J]. 内蒙古石油化工, 2010, 36(21): 139-141.  
 WEI Sanlin, LI Xiaohui, YIN Yuchuan, et al. Formula research and indoor evaluation of chemical viscosity reduction in heavy oil wellbore of Tuha Oilfield [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2010, 36(21): 139-141.
- [9] 曹均合, 孙克己, 麻金海, 等. 胜利油田单六块超稠油乳化降粘室内实验研究[J]. 油田化学, 2003, 20(2): 103-105, 108.  
 CAO Junhe, SUN Keji, MA Jinhai, et al. A laboratory study on viscosity reduction by emulsification for super-heavy crude oil of faulted block reservoir Shan-6 in Shengli [J]. Oilfield Chemistry, 2003, 20(2): 103-105, 108.
- [10] 向晶, 唐善法, 刘志明, 等. 稠油沥青分散剂的筛选及效果研究[J]. 精细石油化工进展, 2015, 16(1): 13-15.  
 XIANG Jing, TANG Shanfa, LIU Zhiming, et al. Selection of viscous oil asphaltene dispersants and study on their effect [J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2015, 16(1): 13-15.
- [11] 黄志宇, 杨林, 王兵, 等. 丙烯酸酯-苯乙烯-马来酸酐三元聚合物油溶性降粘剂的研究[J]. 吉林化工学院学报, 2003, 20(4): 25-27.  
 HUANG Zhiyu, YANG Lin, WANG Bing, et al. Research on the properties of polymer oil soluble viscosity reducers [J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2003, 20(4): 25-27.
- [12] 王世虎, 孙克己, 曹嫣嫫, 等. 用化学方法改进稠油开采效果的技术[J]. 油田化学, 2002, 19(3): 210-213.  
 WANG Shihu, SUN Keji, CAO Yanbin, et al. A technology of chemically improved heavy oil recovery [J]. Oilfield Chemistry, 2002, 19(3): 210-213.
- [13] 石静, 于群, 潘斌林, 等. 稠油降黏驱油剂通用技术条件: Q/SH10202871-2021[S]. 东营: 中国石化集团胜利石油管理局.  
 SHI Jing, YU Qun, PAN Binlin, et al. General technical requirements for viscous oil displacing agents for heavy oil: Q/SH 10202871-2021 [S]. Dongying: SINOPEC Shengli Petroleum Administration Bureau.
- [14] 邹剑, 赵琳, 王弘宇, 等. 稠油沥青质分散剂作用机制[J]. 油田化学, 2020, 37(3): 462-467, 503.  
 ZOU Jian, ZHAO Lin, WANG Hongyu, et al. Action mechanism of dispersants on heavy oil asphaltenes [J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(3): 462-467, 503.
- [15] 蔡新恒, 龙军, 任强, 等. 沥青质分子聚集体的解离对策[J]. 石油学报: 石油加工, 2020, 36(5): 889-898.  
 CAI Xinheng, LONG Jun, REN Qiang, et al. Theoretical study on disaggregation strategies for asphaltene aggregates [J]. Acta Petroli Sinica: Petroleum Processing Section, 2020, 36(5): 889-898.