文章编号:1000-4092(2021)04-708-06

稠油分散性降黏剂的降黏效果及其微观驱油机理*

李洪毅

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015)

摘要:为解决胜利油田稠油热采开发成本高的问题,考察了一种分散性降黏剂L-A对胜利油田稠油的降黏效果,分析了稠油降黏前后的分子结构和黏附力变化,利用微观可视化驱油实验模型研究了微观驱油机理。研究结果表明,在地层温度56 ℃下,分散性降黏剂L-A溶液最佳质量分数为2.0%,降黏剂溶液与稠油最佳体积比为1∶6,降黏率达到94.58%。降黏剂与稠油混合后,降黏剂中的磷羟基P—OH基团与羧酸根—COOH等极性基团插层进入稠油分子间,拆散胶质沥青质的复杂片状分子结构,破坏胶体分散体系与胶质沥青质空间网络结构,分子结构变得松散,缔合作用减弱,黏附力降低,分子间内摩擦力下降,导致原油黏度降低。分散性降黏剂L-A分子微观上能够将吼道盲端、并联喉道以及低渗通道小孔喉区域的剩余油分散携带并剥离,具有洗油和调驱能力。图15表2参17

关键词:稠油;降黏剂;分子结构;剩余油;微观驱油

中图分类号:TE345 **文献标识码**:A DOI:10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.04.023

0 前言

胜利油田稠油储量丰富,产量占比高,主要开发方式为注蒸汽热力采油。相比常规原油,稠油胶质、沥青质含量高,结构复杂,黏度高,流动性能差,开采难度大[1]。目前国内外普遍采用的稠油开采方式主要是注蒸汽开发,通过注入高温蒸汽降低原油黏度,提高稠油的流动性[2-5]。但注蒸汽开发需要消耗大量的蒸汽和燃料,物耗、能耗大,成本高,尤其在低油价形势下,注蒸汽开发严重制约了稠油的效益开发。

化学降黏冷采是接替稠油蒸汽热力采油的一种经济有效的方法[6-8]。目前矿场应用的降黏主要是油溶性降黏剂,其主要作用机理是通过破坏稠油沥青质、胶质分子之间网状结构,拆散聚集体,起到解聚降黏的作用[9-12]。但由于油溶性降黏剂的成本比较高,限制了实际矿场规模化应用。水溶性降黏剂由于其价格相对低廉以及良好的降黏性能而逐步引起重视。水溶性降黏剂本质上是一种表面活性剂,不仅可降低油水界面张力,还可与原油发生乳化作用,形成水包油乳状液,降低稠油表观黏度,增强稠油流动性[13-15]。

胜利乐安油田位于济阳坳陷东营凹陷南斜坡的纯化-草桥鼻状断裂带上,初始地层压力为11.07 MPa,油层温度(56 ℃)下脱气原油黏度为6913 mPa·s,地层水的矿化度为6404～10595 mg/L,属于具有一定矿化度的边底水层状构造普通稠油油藏。由于该油田稠油的黏度较大、地层水的矿化度较高、油层温度较高,因此需要选择一种耐温耐盐的降黏剂以实现苛刻油藏条件下稠油的有效降黏。从室内低压实验条件下测试发现,分散型降黏剂具有较好的稠油降黏效果,是一种比较理想的水溶性降黏剂,但该类型降黏剂在高温高盐油藏条件下对稠油的降黏效果以及降黏机理尚不明晰。本文以乐安油田稠油油样为实验样品,通过一系列室内实验,评价了分散性降黏剂L-A对稠油的降黏效

* **收稿日期**:2020-10-29;**修回日期**:2020-12-18。

基金项目:中国石化股份公司科研项目"稠油蒸汽吞吐低耗高效开发整体优化技术"(项目编号P19018-5)。

作者简介:李洪毅(1983—),男,高级工程师,中国石油大学(北京)石油与天然气工程专业硕士(2012),从事稠油开发科研生产与管理工作,通讯地址:257015 山东省东营市东营区聊城路2号,电话:0546-8715658,E-mail:13963370027@163.com。

果,并从分子结构角度和微观层面上分析了该类型降黏剂的降黏机制及提高采收率机理。

1　实验部分

1.1　材料与仪器

稠油油样,取自胜利乐安油田,油层温度(56 ℃)下脱气原油黏度6913 mPa·s;油田模拟地层水,矿化度17904 mg/L,钙离子含量为114 mg/L;分散性降黏剂L-A,东营孚东石油工程技术有限公司;溴化钾、无水乙醇,国药集团化学试剂有限公司;二维微观刻蚀模型采用真实岩心铸体薄片对圆形玻璃片激光雕刻,模型尺寸6.2 cm×2.2 cm,平均孔隙半径30 μm,平均喉道半径4 μm。

NDJ-8S型旋转黏度计,上海昌吉地质仪器有限公司;Apreo型透射电镜,美国FEI公司;AFM+型多功能原子力显微镜,美国Anasys Instruments公司。

1.2　实验方法

(1)降黏实验

参照标准中国石油化工集团公司企业标准Q/SHCG 65—2013《稠油降黏剂技术要求》和Q/SH 0479—2012《稠油流变性测试-旋转流变仪法》,将一定质量浓度的降黏剂溶液与稠油按一定体积比混合均匀。在油层温度(56℃)、剪切速率25 s^{-1}下测试稠油的黏度,由降黏前后稠油黏度之差与降黏前稠油黏度比计算降黏率。

(2)稠油分散状态观察

首先将稠油样品放入150 ℃恒温箱中烘干,然后放入一定量的无水乙醇,震荡后形成均匀溶液,取出一滴溶液滴在载玻片上,待液滴水分蒸发后采用透射电镜观察稠油分散状态。

(3)黏附力测试

使用原子力显微镜(AFM)对稠油样品进行黏附力测试。具体实验步骤如下:①蘸取少量加降黏剂前后的稠油油样分别均匀涂抹于圆形载玻片上,并用刀片将油膜削得尽可能薄;②将圆形载玻片放入150 ℃恒温箱中烘干;③静置24 h后将载玻片取出,使用原子力显微镜对样品进行测试。实验所用探针为AC20-0型探针,弹性系数为2.0 N/m。根据胡克定律,探针与样品间力的大小即黏附力可表示为弹性系数与探针形变量之积,用公式(1)表示如下:

$$F=k\cdot D \tag{1}$$

式中:F—黏附力,N;k—弹性系数,N/m;D—探针形变量,m。

(4)微观可视化实验

采用二维微观刻蚀模型开展分散性降黏剂驱油机理研究。具体实验步骤如下:①常温下,将刻蚀模型抽真空后饱和水;②油驱水建立束缚水饱和度;③对饱和油模型以1 mL/min的恒速进行水驱,至出口端含水98%结束,并用高清摄像头进行摄像;④水驱后以1 mL/min的注入速率注入降黏剂溶液(质量分数2%、3%),直至出口端含水98%结束,并用高清摄像头进行摄像。对比分析水驱结束及不同浓度降黏剂溶液驱后的驱油图像。

2　结果与讨论

2.1　降黏剂的降黏效果

2.1.1　降黏剂浓度的影响

在温度56 ℃、降黏剂溶液与稠油体积比为1∶6下,分散性降黏剂L-A浓度对稠油的降黏效果如表1所示。从表1可以看出,随着降黏剂质量分数的增大,降黏率大幅增加,当降黏剂质量分数超过2.0%后,降黏率的增加幅度逐渐变小,因此降黏剂溶液的最佳经济质量分数为2%。

表1　降黏剂质量分数对稠油降黏效果的影响

降黏剂质量分数/%	黏度/(mPa·s)	降黏率/%
0	6913	0
0.5	1628	76.45
1.0	832	87.96
1.5	636	90.80
2.0	374	94.58
2.5	336	95.15
3.0	325	95.30

2.1.2　降黏剂溶液与稠油体积比的影响

将降黏剂溶液与稠油按不同体积比混合,稠油的降黏效果如表2所示。从表2可以看出,当质量分数2%的降黏剂溶液与稠油体积比为1∶6,稠油的降黏率最高,为94.58%。降黏剂溶液与稠油体积比过低时,降黏剂在稠油中得不到较好的发挥分散作用,而降黏剂溶液与稠油体积比过高会使降黏剂溶

液与稠油中被拆散的片状分子结合形成新的黏度更大的络合物。

表2 不同降黏剂溶液与稠油体积配比下的降黏效果对比

降黏剂质量分数/%	不同降黏剂溶液、稠油体积比下的降黏率/%		
	1∶5	1∶6	1∶7
1	88.15	91.42	82.38
2	91.23	94.58	92.24
3	91.42	94.48	92.48

2.2 降黏机理分析

2.2.1 分子结构变化分析

从乐安油田稠油样品的分子结构(图1(a))可看出,该稠油分子含有大量的氢键,较强的缔合作用使得胶质、沥青质分子聚集成层状堆积状态[16-17],因而表现出高黏度。分散性降黏剂L-A的分子结构式如图1(b)所示,该降黏剂分子含有—OH、—SH、—COOH、—N=C=S等极性基团,具有亲水性;同时降黏剂分子含有—CH_3、—BH_2非极性基团,又具有一定的亲油性,因此该降黏剂具有亲水-亲油的特性。

加入降黏剂后,稠油与降黏剂分子结合后结构示意图如图1(c)所示。降黏剂分子中部分侧链与支链中的极性基团与稠油片状分子相结合,分子延伸度变大,且稠油本体的杂环原子如S、N大部分被拆散,有效地降低了稠油络合物的复杂度。降黏剂分子通过特殊官能团的综合作用达到降低稠油黏度的作用。乙酸钾基团(—CH_3COOK)中的钾以离子形式存在,可作为"活跃体"分散稠油堆砌复杂的分子体;硼烷基(—BH_2)与亚甲基(—CH_2)形成支链,硼以杂环原子的形式存在于稠油分子中;磷羟基(—P—OH)可通过插层进入稠油分子间起到分散作用;羟基基团(—OH)则通过进入稠油分子中形成强有力的氢键,吸附在沥青质胶质上。稠油本体的沥青质与胶质通过氢键连接形成的缔合作用明显降低,导致胶质与沥青质分子形成的平面层状稳定结构聚集体产生分离,稠油的黏度降低,类同于油溶性降黏剂的降黏机制。

加入降黏剂前后的稠油颗粒透射电镜照片见图2。加降黏剂前,稠油颗粒结构稳定、边缘清晰;而加降黏剂后,在降黏剂作用下稠油颗粒边缘向四周扩散。这说明降黏剂分子在渗透、分散作用下进

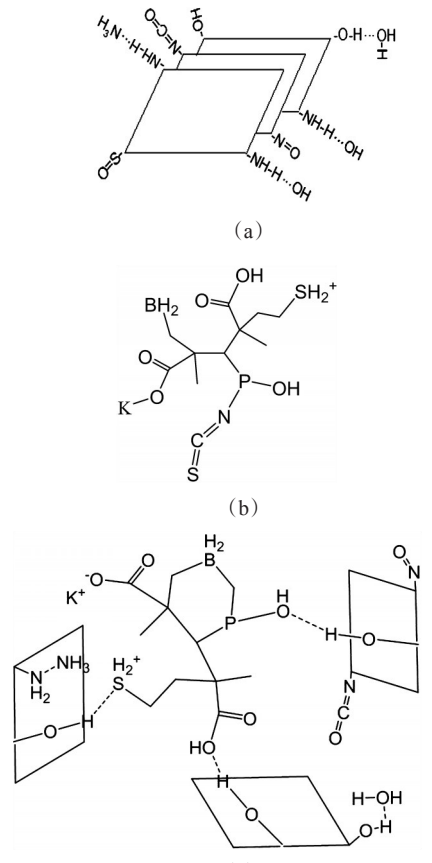


图1 稠油(a)、降黏剂(b)的分子结构式以及稠油与降黏剂分子结合(c)示意图

入胶质和沥青质的片状分子,拆散稠油堆砌重叠的复杂片状分子结构,破坏稳定的胶体分散体系和稠油胶质、沥青质的空间网络结构,结构变得松散。

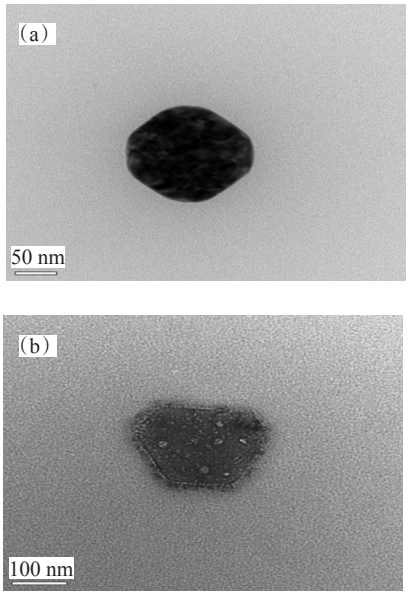


图2 加降黏剂前(a)、后(b)稠油的透射电镜照片

2.2.2　黏附力分析

采用原子力显微镜(AFM)对加入分散性降黏剂前后的稠油样品进行黏附力测试,图像如图3所示。加降黏剂前,稠油样品在圆形载玻片上呈辐射状分布,说明稠油颗粒之间存在着较强的相互作用力,颗粒之间相互黏连,形成细小的桥状通道。加降黏剂后,稠油颗粒呈条带状分布,图像边界明显虚化。

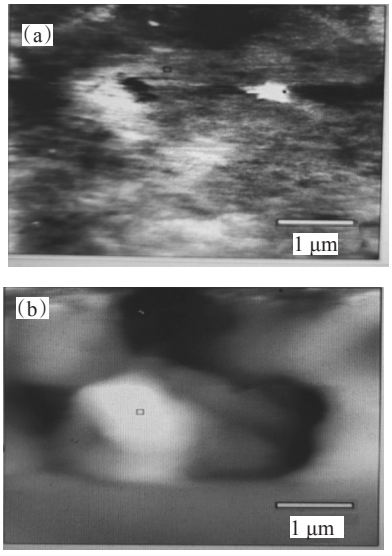


图3　加降黏剂前(a)、后(b)稠油的AFM测试图像

对样品在5 μm×5 μm的扫描范围内均匀地取若干个点做黏附力曲线,如图4所示。形变量D>0时探针与样品间为斥力,D<0时探针与样品间为引力,斥力曲线与引力曲线构成完整闭合的黏附力曲线。根据公式(2)以及曲线图可求得加剂前最大引力为1.2×10^{-7} N,加剂后最大引力为5.4×10^{-8} N。加降黏剂后稠油分子间黏附力降低,说明加入降黏剂后,稠油胶质沥青质分子通过氢键连接形成的缔合作用减小,分子相对位移时的内摩擦力降低,从而原油黏度降低。

2.3　**微观驱油效果**

2.3.1　剩余油分布模式

二维可视化刻蚀模型降黏剂驱的微观剩余油分布见图5。降黏剂驱微观剩余油主要分为4种:包围式簇状、并联式喉道状、死角式点状以及绕流式粒间孔喉状。

(1)包围式簇状剩余油主要存在于被小孔喉所包围的较大孔喉中。由于外围的小孔喉具有较高的毛管力,驱替压差不足以克服毛管力,从而阻止降黏剂进入内部大孔喉,最终使大孔喉内部富集剩余油。

(2)并联式喉道状剩余油主要存在于小喉道与大喉道并联系统中的小喉道内部。由于在并联系统中,大喉道毛管力较小,降黏剂易沿此喉道通过并将喉道内部的原油驱出,使小喉道内部的原油绕流,致使小喉道内部形成剩余油。

(3)死角式点状剩余油主要存在于部分孔隙的角隅、盲端中。分散性降黏剂溶液属于牛顿流体,没有非牛顿流体的黏弹性,当降黏剂经过孔隙角隅或盲端时,原油不会像高分子聚合物依靠黏弹性被洗下来而滞留,最终形成死角式点状剩余油。

(4)绕流式粒间孔喉状剩余油主要存在于高渗条带两侧小孔喉中。降黏剂沿着高渗条带窜流,难以有效波及两侧孔喉尺寸较小的区域,最终形成绕流式粒间孔喉状剩余油。

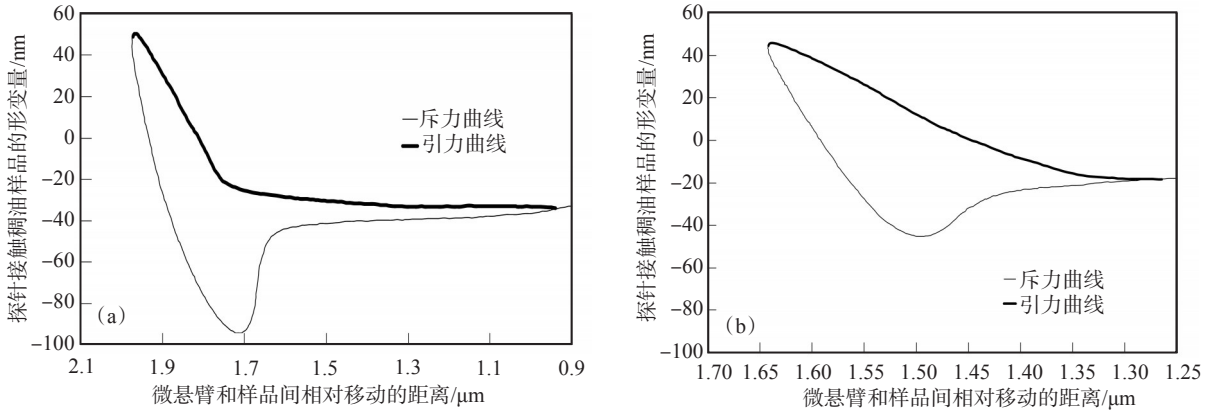


图4　加降黏剂前(a)、后(b)稠油的黏附力曲线

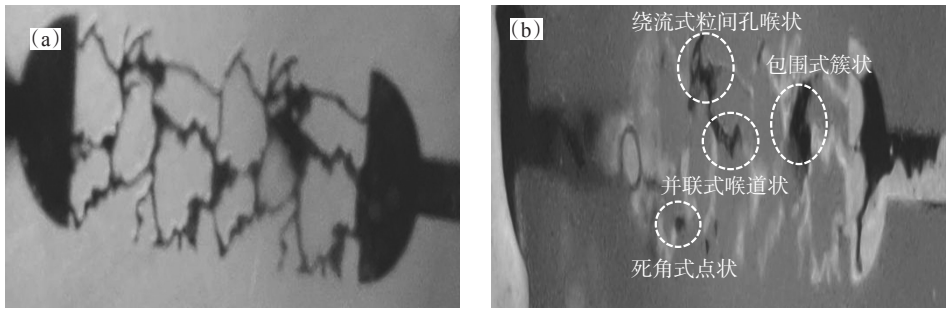
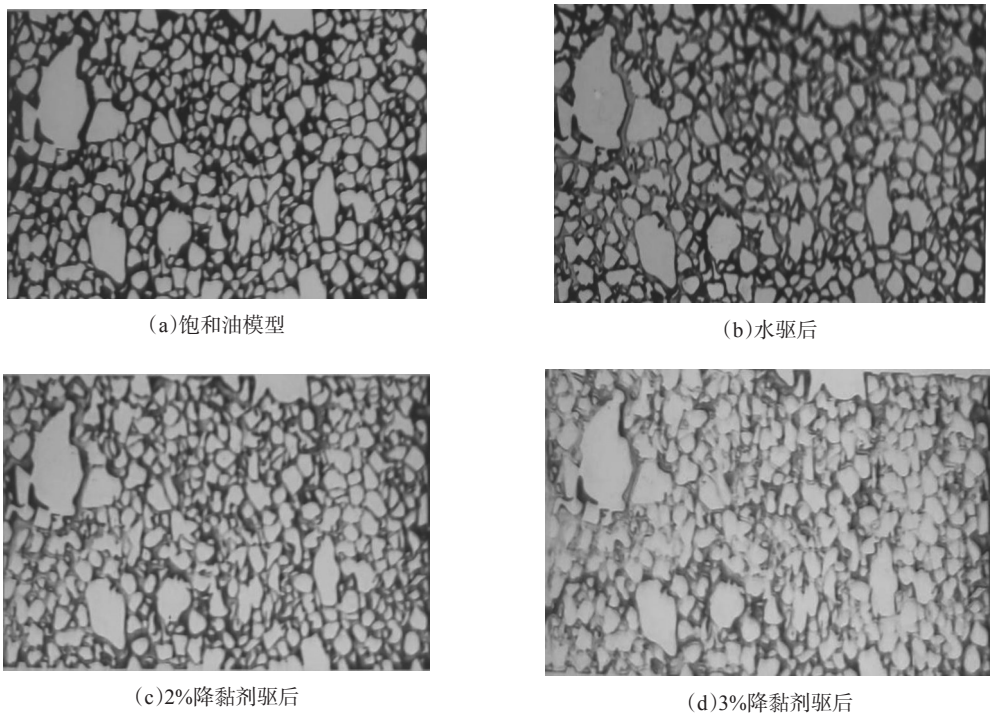


图5 降黏剂溶液驱替前(a)、后(b)的微观刻蚀模型剩余油图像

2.3.2 提高采收率机理

二维微观刻蚀模型饱和原油、水驱、质量分数2%的降黏剂驱、质量分数3%的降黏剂驱后的微观剩余油分布如图6所示。从图6可以看出,水驱剩余油主要存在于颗粒遮挡、盲端、水动力弱、并联孔道和包围式孔道中,并且剩余油呈条带状和平面状富集区。加入分散性降黏剂后,模型中饱和稠油的颜色由深变浅,表明降黏剂分子在水溶性和油溶性双重分散携带作用下,喉道盲端、并联吼道的油水混合液逐步被剥离,起到洗油的作用;同时,随着降黏剂注入浓度的增大,降黏剂驱替范围延伸至高渗带两侧小孔喉区域,提高了低渗通道驱油效率,显示出该降黏剂具有一定的调驱能力。



(a)饱和油模型 (b)水驱后

(c)2%降黏剂驱后 (d)3%降黏剂驱后

图6 微观驱替前后的剩余油分布图

3 结论

分散型降黏剂分子间作用力主要以氢键为主,分子结构稳定,具备亲水-亲油的特性,降黏稳定性好。对稠油颗粒结构具有分散作用,微观上降黏剂分子插层进入稠油胶质沥青质片状分子之间,拆散聚集体,破坏空间网络结构,降低分子间的黏附力,降黏机理与油溶性降黏剂中作用机理类似。与常规水溶性降黏剂相比,分散型降黏剂除了能动用吼道中的剩余油,发挥洗油效率作用外,还可驱替大孔喉两侧的小孔喉区域剩余油,显示出一定程度的微观调驱效应。分散性降黏剂同时具有常规水溶性降黏剂的

乳化降黏作用和油溶性降黏剂的解聚降黏作用，是一种成本低、降黏性能良好的“双性”稠油降黏剂。

参考文献：

[1] 汪双清，沈斌，林壬子. 稠油黏度与化学组成的关系[J]. 石油学报(石油加工)，2010，26(5)：795–799.

[2] 刘文章. 热采稠油油藏开发模式[M]. 北京：石油工业出版社，1998：10–32.

[3] 侯健，孙建芳. 注蒸汽热力采油[M]. 东营：中国石油大学出版社，2012：3–7.

[4] BULTER R M. Thermal Recovery of Oil and Bitumen[M]. Englewood Cliffs：Prentice-Hall，Inc.，1991：154–159.

[5] PRATS M. Thermal recovery[M]. New York/Dallas：Society of Petroleum Engineers of AIME，1982：85–106.

[6] 包木太，范晓宁，曹秋芳，等. 稠油降黏开采技术研究进展[J]. 油田化学，2006，23(3)：284–288.

[7] 周风山，吴瑾光. 稠油化学降黏技术研究进展[J]. 油田化学，2001，18(3)：268–272.

[8] 柳荣伟，陈侠玲，周宁. 稠油降黏技术及降黏机理研究进展[J]. 精细石油化工进展，2008，9(4)：20–25.

[9] 张继国，李安夏，李兆敏，等. 特超稠油油藏HDCS强化热采技术[M]. 东营：中国石油大学出版社，2009：44–45.

[10] 李宾飞，张继国，陶磊，等. 超稠油HDCS高效开采技术研究[J]. 钻采工艺，2009，32(6)：52–54.

[11] 李德儒. GCS-YR油溶性降黏剂的研制与应用[J]. 石油钻采工艺，2016，38(2)：267–271.

[12] 王大喜，陈秋芬，赵玉玲，等. 油溶性降黏剂作用机理的密度泛函计算[J]. 石油学报(石油加工)，2006，21(6)：40–45.

[13] 曹均合，麻金海，郭省学，等. 乳化降黏剂SB-2乳化稠油机理研究[J]. 油田化学，2004，21(2)：124–127.

[14] 崔桂胜. 稠油乳化降黏方法与机理研究[D]. 北京：中国石油大学，2009：20–24.

[15] 王刚霄，王彦玲，李永飞，等. 稠油乳化降黏体系提高采收率[J]. 油田化学，2018，35(4)：682–685.

[16] 秦一鸣，王丽莲. 胶质沥青质相互作用浅析[J]. 石油沥青，2014，28(3)：68–71.

[17] 关润伶. 稠油组分的结构分析及降黏剂的研制[D]. 北京：北京交通大学，2006：47–48.

Viscosity Reduction Effect Evaluation and Micro-flooding Mechanism of Dispersive Viscosity Reducer for Heavy Oil

LI Hongyi

(*Petroleum Exploration and Development Research Institute*, *Shengli Oilfield Company*, *Sinopec*, *Dongying*, *Shandong 257015*, *P R of China*)

Abstract: In order to solve the problem of high development cost of heavy oil thermal recovery in Shengli oilfield, the viscosity reduction effect of a dispersive viscosity reducer L-A was investigated, the changes of molecular structure and adhesion force of heavy oil before and after viscosity reduction were analyzed. The micro-flooding mechanism was studied with microscopic visual oil displacement experimental model. The results showed that when the optimal concentration of dispersive viscosity reducer solution was 2% at formation temperature of 56 ℃, and the optimal volume ratio of viscosity reducer solution to heavy oil was 1∶6, the viscosity reduction rate reached up to 94.58%. When the viscosity reducer was mixed with heavy oil, the P—OH group and carboxylic acid —COOH in the viscosity reducer intercalated into the heavy oil molecules, as a result, the complex sheet molecular structure of gum and asphaltene was broken, and the space network structure of colloidal asphaltene was destroyed. The molecular structure became loose, the association effect was weakened, the adhesion force decreased, and the internal friction between molecules declined, which led to the viscosity of crude oil decreased obviously. On the microscopic level, the dispersive viscosity reducer L-A could disperse and separate the remaining oil from the blind end of the throat, parallel throat and small hole throat of the low permeability channel, demonstrating the ability of oil displacement efficiency and profile control.

Keywords: *heavy oil*; *viscosity reducer*; *molecular structure*; *remaining oil*; *micro-flooding experiment*