

引用格式:魏超平,束宁凯,李伟,等.乳化型降黏剂性能与驱油效果研究[J].油气地质与采收率,2025,32(1):194-203.
WEI Chaoping, SHU Ningkai, LI Wei, et al. Properties and oil displacement efficiency of emulsified viscosity reducer[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2025, 32(1): 194-203.

乳化型降黏剂性能与驱油效果研究

魏超平^{1,2},束宁凯³,李伟²,吴光焕²,赵红雨⁴,钟立国¹

(1. 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院,北京 102249; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东 东营 257015; 3. 中国石化勘探开发研究院,北京 102200; 4. 中国石化胜利油田分公司,山东 东营 257000)

摘要:为解决稠油化学降黏开发中降黏剂对比优选方法不明确的问题,利用室内实验与数理分析方法,建立了降黏剂性能与降黏剂驱油效果的定量关系。采用线性回归法进行单因素分析,确定了降黏剂的各项性能与驱油效率之间的定量关系;根据回归中的相关系数,明晰了影响驱油效率的主要性能;提出驱油程度和驱油指数2项指标,利用归一化处理方法,形成了反映驱油效率的驱油指数计算方法。研究表明:最小乳化转速、降黏率、乳状液粒径和吸附损失是影响驱油效率的主要性能,脱水率和洗油效率对驱油效率具有一定影响,在低界面张力范围内,界面张力影响不明显;最小乳化转速、乳状液粒径、吸附损失、脱水率与驱油效率呈负相关,降黏率、洗油效率与驱油效率呈正相关;具有易乳化、乳化后油滴可通过性高、降黏剂抗吸附能力强、乳化后原油流动性强、对原油的剥离作用强的降黏剂更容易获得较高的驱油效率;驱油指数与驱油效率明显呈线性正相关,驱油指数大小可以评判驱油效率高。矿场降黏吞吐与降黏驱试验验证了评价方法的合理性及实用性。

关键词:降黏剂;化学降黏开发;驱油效率;乳化性能;评价与优选

文章编号:1009-9603(2025)01-0194-10

DOI:10.13673/j.pgrec.202404033

中图分类号:TE357.4

文献标识码:A

Properties and oil displacement efficiency of emulsified viscosity reducer

WEI Chaoping^{1,2}, SHU Ningkai³, LI Wei², WU Guanghuan², ZHAO Hongyu⁴, ZHONG Ligu¹

(1. Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China; 3. SINOPEC Exploration and Production Research Institute, Beijing City, 102200, China; 4. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: To solve the problem of unclear comparison and optimization methods for viscosity reducers in the development of chemical viscosity reduction for heavy oil, a quantitative relationship between the properties of viscosity reducers and their oil displacement efficiency was established using laboratory experiments and mathematical analysis methods. The quantitative relationship between the various properties and the oil displacement efficiency of the viscosity reducers was determined by using the linear regression method for a single-factor analysis. Based on the correlation coefficient in the regression, the main properties affecting oil displacement efficiency were clarified. Two indicators, namely oil displacement degree and oil displacement index, were proposed, and a calculation method for the oil displacement index that reflected the oil displacement efficiency was established. Research shows that the minimum emulsification speed, viscosity reduction rate, particle size of emulsion, and adsorption loss are the main

收稿日期:2024-04-18。

作者简介:魏超平(1982—),男,湖北汉川人,副研究员,在读博士研究生,从事稠油油藏开发研究。E-mail:chaopingwei@163.com。

通信作者:钟立国(1976—),男,内蒙古科右前旗人,教授,博士。E-mail:zhlg1976@qq.com。

基金项目:山东省泰山产业创新项目“生物化学复合提高难采稠油采收率技术创新及产业化”,中国石化科研攻关项目“套管钻井井网重构技术研究与应用”(P18050-4)。

properties affecting oil displacement efficiency. Dehydration rate and oil washing efficiency have a certain impact on oil displacement efficiency. In the low interfacial tension range, the influence of interfacial tension is not significant. The minimum emulsification speed, particle size of emulsion, adsorption loss, and dehydration rate are negatively correlated with oil displacement efficiency, while viscosity reduction rate and oil washing efficiency are positively correlated with oil displacement efficiency. A viscosity reducer featuring easy emulsification, high oil droplet passability after emulsification, strong anti-adsorption ability, strong flowability of emulsified crude oil, and strong stripping effect on crude oil is more likely to achieve higher oil displacement efficiency. The oil displacement index and oil displacement efficiency are linearly positively correlated, and the index can reflect the oil displacement efficiency. The rationality and practicality of the evaluation method have been verified through viscosity reduction stimulation and viscosity reduction displacement tests in the mining field.

Key words: viscosity reducer; development of chemical viscosity reduction; oil displacement efficiency; emulsification performance; evaluation and optimization

世界上稠油资源丰富,主要有热采和水驱2种开发形式。热采降黏效率高、开发效果较好,如蒸汽驱、SAGD、火烧等,采收率可以达到40%以上^[1-8],但其操作成本较大,同时在制蒸汽过程中会排放CO₂,对环境造成一定的影响;水驱投资小、对环境影响小,但由于高的油水黏度比,其开发效果往往较差,当原油黏度高于150 mPa·s时,采收率一般在20%左右。

近几年,胜利油田提出了稠油化学降黏开发技术^[9-14],即向稠油油藏中注入化学降黏剂用于提高原油在地层中的流动性。化学降黏开发技术主要有2种形式,化学降黏吞吐和化学降黏驱,所用降黏剂以乳化型降黏剂为主,降黏的主要机理是通过形成水包油的乳状液,使原油在渗流过程中的阻力由油组分之间的内摩擦力转变为水分子之间的内摩擦力,起到降低表观黏度的作用^[15-16]。魏超平等分析微观蚀蚀模型和填砂模型认为,降黏剂在“分散乳化、降张驱油、乳液调驱、贾敏效应”等作用下,可提高驱油效率和波及系数,最终实现采收率的提高^[17-18]。对于降黏剂性能与驱油效率之间的关系,目前没有系统和统一的结论,一般以降黏率作为评价降黏剂的指标^[19-23]。部分学者就降黏剂与驱油效率的关系进行了一些探索:葛际江等提出了用最小乳化转速表征降黏剂乳化稠油的难易程度^[24-25],通过驱替实验得出,界面张力与驱油效率对应关系不好,而最小乳化转速与驱油效率有较好的对应关系,最小乳化转速越小,驱油效率越高;刘鹏等通过对比SHY-1和YD-G1驱油体系与濮城油田原油(1 mPa·s)测试结果发现,析水率是影响驱油效果的重要因素,析水率低,体系乳化性能好,最终驱油效果好^[26]。上述研究揭示了降黏剂某一项性能与驱油效率之间的关系,但存在研究不全面的问题,没有分析降黏剂的洗油效率、吸附损失、乳状液性质、稳

定性等性能与驱油效率的关系。关于降黏剂的评价优选方面,由于这一开发技术仍属于一项新的、探索性的技术,目前没有统一的行业规范和报道。胜利油田根据自身研究成果及矿场实践,建立了化学降黏驱降黏剂筛选的企业标准^[27]。依照该标准,降黏剂性能的主要评价指标有界面张力、降黏率、洗油效率、抗吸附能力、脱水率等,矿场主要根据这5项指标来筛选降黏剂。但是该标准没有说明降黏剂驱油效果的主控因素,使得利用该标准对降黏剂优选时有一定难度。例如,有2种性能都满足筛选要求的降黏剂A和B,A某方面的性能优于B,而另一方面性能差于B,那么哪一种更优,标准无法给出优选方案。因此,针对目前降黏剂性能与驱油效果评价不全面、主控因素不明、优选标准不清3方面的问题,选取了5种胜利油田矿场常用的降黏剂,对7个性能指标全面测定其与驱油效率之间的关系,按相关系数,把7个影响因素分为3类,确定了影响降黏剂驱油效果的主控因素,并对其进行归一化处理,建立了降黏剂驱油指数这一评价指标,指导了矿场对降黏剂的优选。结合矿场应用效果,验证了优选方式的正确性与合理性。

1 实验器材与方法

1.1 实验材料

实验用油取自胜利油田J区块油井,为油藏温度下脱水脱气原油,密度为0.967 g/cm³,黏度为505.6 mPa·s, SARA四组分显示重质成分占比较大,其中胶质占比为17.83%、沥青质占比为2.24%,为普通稠油。

实验用水采自J区块采出水,氯离子质量浓度为1 990 mg/L,总矿化度为3 490 mg/L,水型为CaCl₂型。

采用5种乳化型降黏剂,编号依次为J1、J2、J3、J4和J5(图1)。J1和J2为目前胜利油田矿场应用产品,产自山东省东营市2个化工生产企业;J3和J4为常见表面活性剂,J3为十二烷基三甲基氯化铵,J4为十二烷基硫酸钠;J5为中国某高校自研产品,以非离子型表面活性剂脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO12)为原料制备。



图1 质量分数为0.5%时5种乳化型降黏剂溶液

Fig.1 Five emulsified viscosity reducers (mass fraction of 0.5%)

1.2 实验设备

实验设备包括:德国产SVT20视频旋转滴张力仪、HAAKE MARS IV模块化高温高压流变仪、恒温箱、数显乳化机、激光粒度仪、TM4000plus扫描电子显微镜、奥林巴斯BX53电子荧光显微镜及一维驱油效率测试实验装置(图2)。

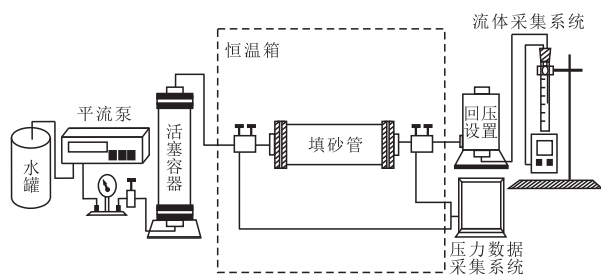


图2 一维驱油效率测试实验装置

Fig.2 Device for one-dimensional oil displacement efficiency experiment

1.3 实验方法

界面张力 利用旋滴法,在转速为6 000 r/min下测定搅拌30 min后不同质量分数(0.1%、0.3%、0.5%和0.8%)降黏剂溶液与原油的界面张力。

最小乳化转速 向恒温玻璃容器中依次加入一定体积的油水质量比为3:7的乳化型降黏剂溶液和脱水脱气稠油,在50℃下预热10 min后,以40 r/min的转速启动搅拌,考察原油能否在10 min内完全分散进入水相。若能,则将转速降低10 r/min,继

续实验;否则,将转速提高10 r/min,继续实验,直至找出能使原油在水中分散所需的最小转速,此转速即为最小乳化转速。测定时,搅拌片的搅动作用通过水相逐渐传递到油相中,对于乳化能力强的降黏剂,在低转速下即可观察到油相一层层分散进入水相;而对于乳化能力较差的降黏剂,则需在足够高的转速下才可一层层分散进入水相。

降黏率 采用HAAKE MARS IV模块化高温高压流变仪对不同质量分数降黏剂形成乳状液的黏度进行测试,剪切速率为 5 s^{-1} 。降黏率计算式为:

$$f = \frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0} \quad (1)$$

式中: f 为降黏率; μ_0 为实验温度下油样的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; μ 为实验温度下乳化后油水混合液的黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

乳状液粒径 使用数显乳化机对乳状液进行乳化,搅拌速率为3 000 r/min,搅拌时间为3 min,以确保其完全乳化。应用奥林巴斯BX53电子荧光显微镜对其微观乳化状态进行观测,利用激光粒度仪对其粒径进行测试。

脱水率 取乳化后油水混合液,在油藏温度下静置4 h,读取量筒下部出水体积(精确至0.1 mL),自然沉降脱水率计算式为:

$$X = \frac{V}{V_0} \quad (2)$$

式中: X 为自然沉降脱水率; V 为乳化后油水混合液静置4 h后的出水体积,mL; V_0 为乳化后油水混合液中的含水量,mL。

吸附损失 模拟地层砂和降黏剂溶液(质量分数为0.5%)按照质量比为1:3混合,充分搅拌后放置于油藏温度恒温密闭保存24 h;取上清液(若浑浊则用离心机离心)测试与原油的界面张力;根据降黏剂在不考虑吸附时的浓度-界面张力曲线,读出吸附后界面张力对应的相当浓度值,然后计算吸附损失,其表达式为:

$$\alpha = (W_1 - W_2)/W_1 \quad (3)$$

式中: α 为吸附损失; W_1 为吸附前质量分数,%; W_2 为吸附后界面张力对应的相当浓度,%。

洗油效率 具体实验步骤如下:①将模拟地层砂与实验油样按质量比为4:1混合,放入恒温箱中,在油藏温度下老化7 d,每天搅拌1次,使油砂混合均匀。②称取5 g老化好的油砂放至100 mL锥形瓶中,加入降黏剂溶液50 g(质量分数为0.5%),充分混合后在油藏温度下静置48 h。③将静置后的样品溶液中漂浮的原油及瓶壁上黏附的原油用干净的

棉纱蘸出,倒出样品溶液,用蒸馏水冲洗油砂2~3次至没有泡沫,小心倾倒出溶液;将锥形瓶放在105℃恒温箱中烘至恒重,称重。④用石油醚对步骤③中烘干后的油砂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℃烘箱中烘干2h,称重。⑤计算洗油效率。

洗油效率计算式为:

$$\sigma = \frac{m + m_1 - m_2}{m + m_1 - m_3} \quad (4)$$

式中: σ 为洗油效率; m 为老化油砂的质量,g; m_1 为锥形瓶质量,g; m_2 为洗油后锥形瓶与油砂的总质量,g; m_3 为锥形瓶与洗净后地层砂的总质量,g; m 、 m_1 、 m_2 、 m_3 均精确至0.001g。

驱油效率 通过一维驱油效率测试实验,评价5种降黏剂的驱油效率,实验装置如图2所示。实验采用的填砂管长度为15cm;填砂管渗透率为1000mD;降黏剂质量分数为0.5%。实验步骤如下:①抽真空1h后饱和水,计算饱和水量和孔隙度。②在油藏温度下饱和油,通过计量采出水量计算饱和油量和束缚水饱和度。③在油藏温度下老化48h。④使用质量分数为0.5%的降黏剂溶液驱替原油,在出口处计量并且记录产出液量和水量。⑤当采出液含水率高于98%时,停止注入,计算驱油效率。

2 实验结果分析

2.1 降黏剂各项性能分析与对比

2.1.1 界面张力

界面张力表征油/水之间的界面能,乳化是一个油/水界面能增大的过程,通常认为,油/水界面张力越低,越容易形成乳状液。对不同质量分数下5种降黏剂溶液与稠油之间的界面张力进行了测试(图3),在50℃条件下,脱水脱气原油与水界面张力为4.721mN/m;加入降黏剂后,油/水界面张力均小于该值,说明5种降黏剂都具有降低油/水界面张力的效果。5种降黏剂与脱水脱气原油界面张力由小到大(降低界面张力能力由强到弱)的顺序依次为J3、J1、J5、J2、J4。当降黏剂质量分数为0.5%时,J3、J1和J5能将稠油/水界面张力降低2个数量级;J2和J4能够将稠油/水界面张力降低1个数量级。实验结果显示,随着质量分数的升高,5种降黏剂降低界面张力均存在一个拐点,界面张力呈2个变化阶段,即快速降低阶段和基本稳定阶段。当质量分数小于0.5%时,随着质量分数的升高,界面张力降低显著;当质量分数大于0.5%后,随着质量分数继续增

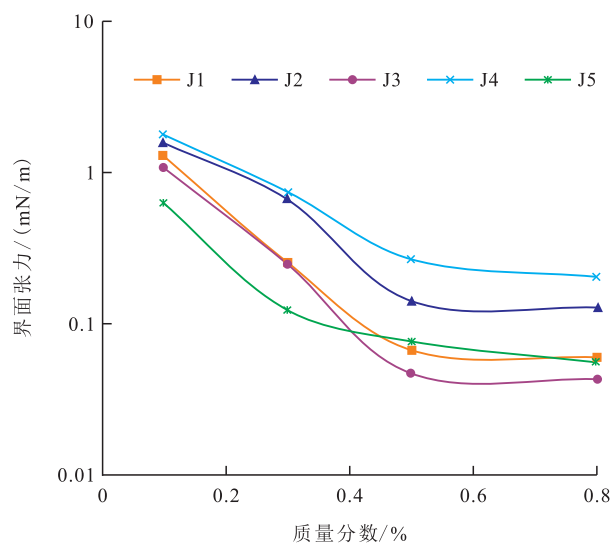


图3 不同质量分数下油/水界面张力

Fig.3 Oil-water interfacial tension at different mass fractions

大,界面张力降低幅度变小。

2.1.2 最小乳化转速

最小乳化转速主要反映形成乳状液的难易程度^[19]。乳化需要一定的能量,乳化所需的搅拌速度越小,表示原油和降黏剂形成的混合物越容易发生乳化。5种降黏剂其最小乳化转速差异很大,最小为20r/min,最大为100r/min。最小乳化转速从小到大(乳化难易程度由易到难)依次为J5(20r/min)、J2(60r/min)、J4(80r/min)、J3和J1(100r/min)。在最小乳化转速下持续搅拌10min过程中的乳化状态如图4所示。降黏剂J5在20r/min的条件下,60s便发生大面积乳化,100s时已经完全乳化。降黏剂J3在100r/min条件下,乳化仍然较难发生,稠油先被拉成长条,然后进一步被切断乳化。

2.1.3 降黏率

黏度反映原油流动性,降黏率是衡量降黏剂提高原油流动性的重要指标。5种降黏剂在质量分数大于0.5%时,均能将稠油黏度降低达到90%以上(表1)。当质量分数为0.5%时,降黏率由大到小(原油流动性由强到弱)依次为J4、J5、J2、J1、J3。其中,降黏剂J5形成乳状液黏度最低,降黏率最高,质量分数为0.1%时降黏率仍高达92.96%。质量分数降低对降黏剂J3降黏效果影响最大,在低质量分数(0.1%)条件下降黏率仅为59.12%。

2.1.4 乳状液粒径

粒径是决定乳化后形成的油滴通过多孔介质的能力之一。具体表现为,粒径小,油滴可直接通过孔喉;反之,容易形成贾敏效应或架桥作用,出现孔喉堵塞,阻碍油滴通行。5种降黏剂形成乳状液



图4 不同降黏剂最小乳化转速测试结果

Fig.4 Test results of minimum emulsification speeds for different viscosity reducers

表1 不同质量分数降黏剂的降黏率测试统计
Table1 Statistics of viscosity reducer mass fractions and viscosity reduction rates

降黏剂	降黏率/%			
	质量分数为0.8%	质量分数为0.5%	质量分数为0.3%	质量分数为0.1%
J1	96.88	91.57	87.58	75.38
J2	98.16	94.92	89.04	79.59
J3	97.98	83.25	79.33	59.12
J4	98.34	97.11	94.13	84.71
J5	98.71	97.90	96.56	92.96

的粒径随着质量分数的增大而降低。在相同条件下(质量分数为0.5%)时,乳状液粒径从小到大依次为(油滴通过性由高到低)J5、J4、J1、J2、J3(图5)。降黏剂J5乳化能力最好,乳状液粒径最小且分布均匀,质量分数为0.8%时,乳状液粒径仅为6.6 μm;质量分数降低至0.1%,乳状液粒径增大至13.7 μm。

2.1.5 脱水率

脱水率主要反映乳状液的稳定性。脱水率越低,说明乳状液越稳定;反之,乳状液稳定性越差,在渗流过程中容易破乳,导致油相聚并或重新吸附到岩石表面。测试中,稠油-降黏剂在受到震荡剪切

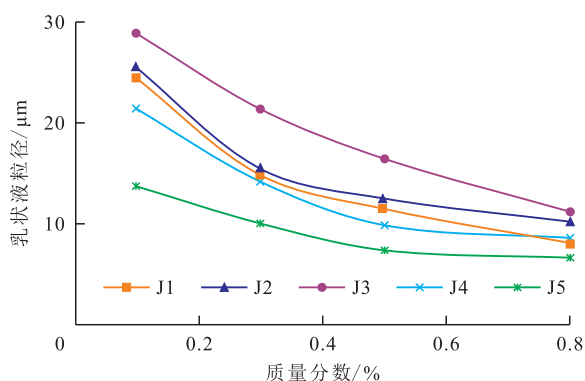


图5 不同降黏剂形成乳状液粒径与质量分数的关系
Fig.5 Relationship between particle sizes and mass fractions of emulsions formed by different viscosity reducers

时,分散成油滴,在降黏剂中活性分子的作用下,形成了油/水乳状液。静置后,在重力场的作用下,油滴会在水相中逐渐上浮,形成一个分散油滴较多、油相体积分数较大的浓乳化层;而其下部则为油滴直径较小、油滴体积分数小的稀乳化层。随测试时间增加,油滴不断上浮,稀乳化层逐渐向水层转变,乳状液中的水被析出。5种降黏剂形成的乳状液稳定性测试结果显示:随着时间的增加,脱水率均增高,说明乳状液在自然条件下是一个不稳定的状态,油和水有自发分离的趋势;各降黏剂脱水率差异较大,说明降黏剂的成分不同会造成油/水界面膜强度存在差异。降黏剂J5经4 h自然沉降脱水率仅为12%,其形成的乳状液相对稳定,脱水率从小到大(乳状液稳定性从强到弱)依次为J5、J2、J1、J3、J4(图6)。

2.1.6 吸附损失

吸附损失反映降黏剂在油藏中的抗吸附能力,吸附损失越小,抗吸附能力越强,油水体系中实际降黏剂的有效浓度越大。降黏剂溶液在注入油藏后,会与油藏岩石接触,并且滞留于岩石颗粒表面。随着流动距离增大,其吸附滞留量越来越大,乳化原油的能力会越来越差。因此,降黏剂的吸附损失也是考核降黏剂性能的重要指标。通过吸附损失后的界面张力,结合降黏剂的浓度-界面张力曲线,标定吸附后的降黏剂质量分数。由5种降黏剂吸附前后的界面张力(图7)可见,降黏剂J2(质量分数为0.5%)吸附前界面张力为0.143 8 mN/m,吸附后界面张力为0.283 mN/m,吸附后的界面张力与其没有吸附时质量分数为0.44%相当(图3),其吸附损失为12%。5种降黏剂吸附损失从小到大(抗吸附能力从强到弱)依次为J2、J5、J4、J1、J3。

2.1.7 洗油效率

洗油效率影响驱替中残余油饱和度。洗油效

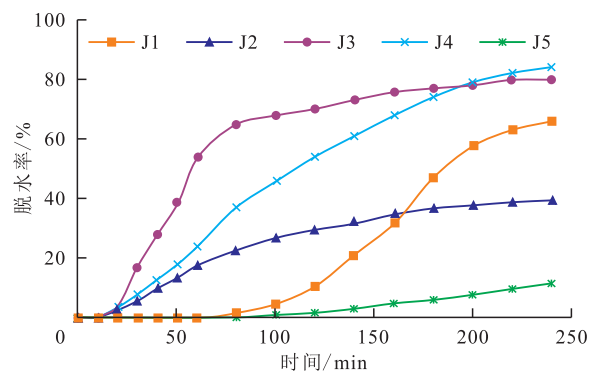


图6 质量分数为0.5%时不同降黏剂对乳状液稳定性的影响

Fig.6 Influence of different viscosity reducers at mass fraction of 0.5% on stability of emulsions

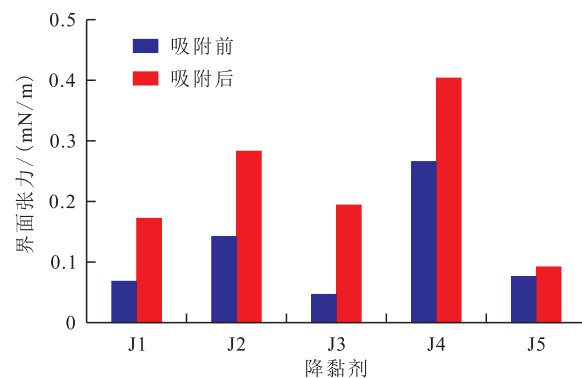


图7 不同降黏剂吸附前后界面张力

Fig.7 Interfacial tension before and after adsorption with different viscosity reducers

率越高,降黏剂剥离原油能力越强。5种降黏剂洗油效率差异非常大,其中,降黏剂J5、J4、J2的洗油效率均超过50%,而降黏剂J1的洗油效率仅为15.07%(图8)。洗油效率从高到低(降黏剂剥离原油能力由强到弱)依次为J5、J4、J2、J3、J1。

2.1.8 驱油效率

驱油效率是反映降黏剂在多孔介质中驱油性最直接的指标。在进行化学降黏开发药剂评价与优选中,通常要求驱油效率越高越好。实验所用5种降黏剂驱油性能差异较大,J5驱油效率最高,为69.01%,J3驱油效率仅为49.74%(图9)。驱油效率从大到小依次为J5、J2、J4、J1、J3。

3 降黏剂驱油性评价指标

3.1 单项指标与驱油效率评价

根据实验结果,建立降黏剂性能与驱油效率的统计结果(表2)。采用线性回归法,得出降黏剂的每一项性能与驱油效率的定量关系(表3)。根据回归中相关系数的大小,把影响驱油效率的性能指标

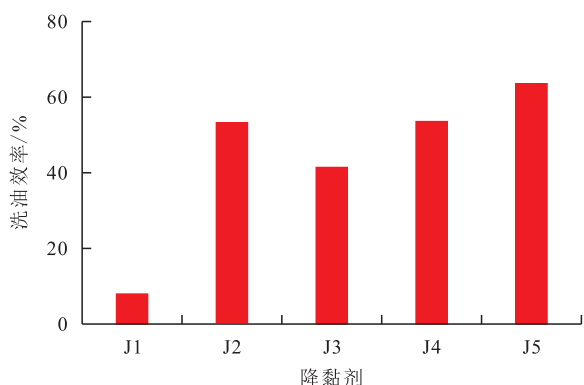


图8 降黏剂类型对洗油效率的影响
Fig.8 Influence of viscosity reducer types on oil washing efficiencies

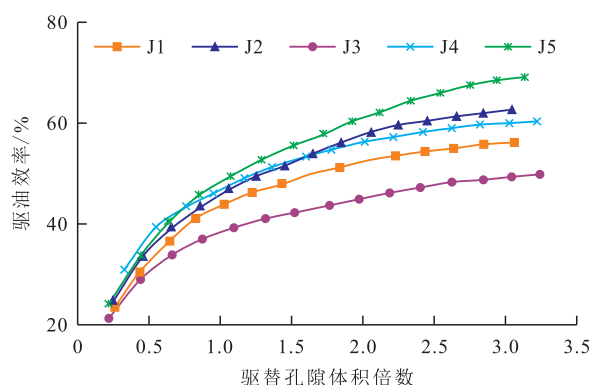


图9 5种降黏剂驱替孔隙体积倍数与驱油效率关系
Fig.9 Relationship between pore volume displacement multiples and oil displacement efficiencies of five types of viscosity reducers

分为3类。

明显影响因素 最小乳化转速、降黏率、乳状液粒径和吸附损失与驱油效率之间具有明显的相关性,相关系数为0.80~0.86。具体表现为:最小乳化转速、乳状液粒径和吸附损失与驱油效率呈负相关,降黏率则与驱油效率呈正相关。说明乳化的难易程度、乳化后油滴的可通过性、降黏剂的抗吸附能力和乳化后原油的流动性对驱油效率有明显的影 响,具体表现为:油水越容易乳化、乳化原油流动性越强、油滴可通过性越强、降黏剂抗吸附能力越

强,驱油效率越高。

一般影响因素 脱水率和洗油效率对驱油效率有一定影响,相关系数分别为0.662 1和0.411 7。具体表现为脱水率与驱油效率呈负相关,洗油效率与驱油效率呈正相关。说明乳状液越稳定、降黏剂剥离原油能力越强,驱油效率越高。

不敏感因素 在低界面张力范围内(0.1~0.001 mN/m),界面张力与驱油效率相关系数仅为0.068 1,说明两者相关性很低,表示界面张力与驱油效率之间没有明显关系。

表2 降黏剂性能与驱油效率的统计结果
Table2 Statistics of properties and oil displacement efficiency of viscosity reducers

降黏剂	界面张力/(mN/m)	最小乳化转速/(r/min)	降黏率/%	乳状液粒径/ μm	脱水率/%	吸附损失/%	洗油效率/%	驱油效率/%
J1	0.066 7	100	91.57	11.6	66	19	8.07	56.28
J2	0.143 8	600	94.92	12.7	40	12	53.25	62.35
J3	0.048 8	100	83.25	16.4	80	23	41.87	49.74
J4	0.268 1	80	97.11	10.1	84	14	54.17	60.51
J5	0.076 7	20	97.90	7.3	12	13	64.25	69.01

表3 降黏剂性能与驱油效率的定量关系
Table3 Quantitative relationship between properties and oil displacement efficiencies of viscosity reducers

降黏剂性能	与驱油效率的关系式	相关系数
界面张力	$y=21.025x+57.098$	0.068 1
最小乳化转速	$y=-0.198 1x+73.904$	0.850 1
降黏率	$y=1.104 9x-43.065$	0.836 4
乳状液粒径	$y=-1.907 3x+81.801$	0.803 7
脱水率	$y=-0.193 7x+70.563$	0.662 1
吸附损失	$y=-1.397 1x+82.271$	0.818 8
洗油效率	$y=0.244 1x+48.479$	0.411 7

6项指标对驱油效率均有影响,说明降黏剂的驱油效率受多因素影响。但没有1项指标相关系数达到0.9以上,说明降黏剂任一性能均不能单独决定驱油效率。

3.2 驱油性能评价方法建立

驱油效率直接反映降黏剂的驱油性能,但该项指标测定需要进行岩心制作、饱和油、老化、驱油等过程,时间周期较长、人力投入也较大,更困难的是,目前大部分降黏剂研发机构没有驱油实验装置,影响了研发—评价—再研发这一进程。为了便于降黏剂的研发,同时指导矿场降黏剂的优选,提出降黏剂“驱油指数”这一评价指标,通过其衡量降黏剂的驱油效率。这个指数应该具有以下2方面的

优势:根据指数的大小即可对比降黏剂驱油效率的高低;指数获取方便、易于操作。

驱油指数应充分反映最小乳化转速、降黏率、乳状液粒径和吸附损失这4项主要影响指标。驱油指数建立过程包括2步。第一步,按照处理后指标为0~1,且与驱油效率呈正相关,数值越大、驱油效率越大的要求,对4项指标分别进行归一化处理,处理过程为:①选择归一参数。降黏剂的某一性能为 X ,本次有5个样品点,性能值为 $[X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]$,其对应的驱油效率分别为 $[Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5]$ 。②找出最大性能值 X_{max} 和最小性能值 X_{min} 。③设定性能 X 的驱油程度为 Z , Z 属于0~1。对与驱油效率呈正相关的性能,如降黏率,令 X_{max} 时驱油程度为1, X_{min} 时驱油程度为0,即存在2个端点 $[X_{max}, 1]$ 和 $[X_{min}, 0]$;对与驱油效率呈负相关的性能,如最小乳化转速、乳状液粒径和吸附损失,则令 X_{max} 时驱油程度为0, X_{min} 时驱油程度为1,即存在2个端点 $[X_{max}, 0]$ 和 $[X_{min}, 1]$ 。④归一转化。以2个端点 $[X_{max}, 1]$ 、 $[X_{min}, 0]$ 或 $[X_{max}, 0]$ 、 $[X_{min}, 1]$ 建立性能值与驱油程度的线性关系曲线,即 $Z=F(X)$,5个样品点 $[X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]$ 对应驱油程度 $[Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5]$ 。第二步,计算驱油指数(G)。对最小乳化转速的驱油程度、降黏率的驱油程度、乳状液粒径的驱油程度和吸附损失的驱油程度求取平均数即为 G 。

应用降黏剂各项性能的驱油程度计算公式(表4),计算5种降黏剂各项性能的驱油程度和驱油指数(表5)。从降黏剂的驱油指数与驱油效率之间的回归关系分析,两者相关性极高(图10),相关系数高达0.9855,说明驱油指数能完全反映驱油效率,两者之间的定量关系为:

$$E=19.221G+49.312 \quad (5)$$

式中: E 为驱油效率; G 为驱油指数。

采用驱油指数评价化学降黏开发中降黏剂的驱油性能具有以下2点优势:①驱油指数仅通过一个指标就能反映降黏剂对驱油效率的影响,并且实现了量化表征,指数越大、驱油效率越高,可准确对比。②计算驱油指数仅需测得4项指标且不需要

表4 不同影响因素驱油程度计算公式

影响因素	驱油程度计算公式
最小乳化速度	$Z=-0.0125x+1.25$
降黏率	$Z=0.0682x-5.6802$
乳状液粒径	$Z=-0.1099x+1.8022$
吸附损失	$Z=-0.0909x+2.0909$

表5 降黏剂驱油性能计算统计
Table5 Calculation and statistics of oil displacement properties of viscosity reducers

降黏剂	不同影响因素下的驱油程度				驱油指数
	最小乳化转速	降黏率	乳状液粒径	吸附损失	
J1	0	0.57	0.53	0.36	0.36
J2	0.5	0.79	0.41	1	0.67
J3	0	0	0	0	0
J4	0.25	0.94	0.69	0.82	0.68
J5	1	1	1	0.91	0.98

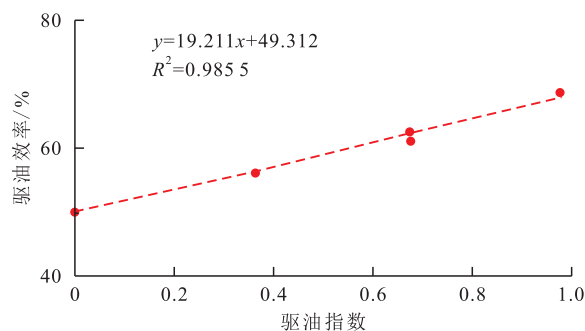


图10 驱油指数与驱油效率的关系

Fig.10 Relationship between oil displacement index and oil displacement efficiency

进行驱油实验,评价过程简单快捷。

4 评价方法验证与矿场应用

4.1 评价方法验证

为验证上述评价的合理性与实用性,在胜利油田矿场选取另一款降黏剂产品J6,其4项主要性能包括:最小乳化转速为120 r/min,降黏率为87.6%,乳状液粒径为13.4 μm,吸附损失为12%。利用所建立的评价方法,降黏剂J6驱油指数为0.29,利用式(5),计算其驱油效率为54.83%,驱油实验测试数据为53.69%,误差仅为2.13%。矿场实践表明,使用降黏剂J2实施降黏吞吐65井次,平均周期单井注入量为21.3 t,平均单井周期增油量为306 t,吨剂增油量为14.4 t;使用降黏剂J6实施降黏吞吐13井次,平均周期单井注入量为18.5 t,平均单井周期增油量为133 t,吨剂增油量为7.2 t。

4.2 矿场应用

胜利油田J区块砂体埋深为730~970 m,孔隙度为36.5%,渗透率为720 mD,压力为7.32 MPa,地层温度为47.5℃,50℃地面条件下平均原油黏度为900 mPa·s,为高孔高渗透普通稠油油藏。为提高该块的开发效果,在已有的水驱井网上,开展化学降黏驱开发。从矿场获取区块油样,分别测试了6种

降黏剂的4项性能;利用所建立的驱油性能评价方法,求取了6种产品的驱油指数(表6);最终采用驱油指数最高的降黏剂K6在矿场进行应用。化学降黏驱一个月后,试验井组日产油量由14.6 t/d升至28.1 t/d,化学降黏驱开发效果达到预期目标。

表6 6种降黏剂主要指标统计

Table6 Statistics of main indicators of six types of viscosity reducers

降黏剂	最小乳化 转速/(r/min)	降黏率/ %	乳状液 粒径/ μm	吸附 损失/%	驱油 指数
K1	40	94.70	10.7	42	0.713
K2	80	94.50	16.7	48	0.341
K3	80	90.60	12.9	26	0.492
K4	100	87.60	14.8	10	0.391
K5	60	95.10	20.1	13	0.579
K6	60	97.80	11.7	20	0.824

5 结论

(1)确定了降黏剂7项性能指标对驱油效率的影响大小:最小乳化转速、降黏率、乳状液粒径和吸附损失是影响驱油效率的主要因素;脱水率和洗油效率对驱油效率具有一定影响;在低界面张力范围内(0.001~0.1 mN/m),界面张力对驱油效率影响不明显。

(2)明确了降黏剂6项影响性能与驱油效率之间的关系:最小乳化转速、乳状液粒径、吸附损失、脱水率与驱油效率呈负相关,即乳化越容易、乳化后油滴的可通过性强及降黏剂抗吸附能力越强,降黏剂驱油效率越高;降黏率、洗油效率与驱油效率呈正相关,即乳状液后原油流动性越强、降黏剂对原油的剥离作用越强,降黏剂驱油效率越高。

(3)提出了降黏剂驱油指数这一指标,建立了降黏剂性能与驱油效率之间的关系,给出了驱油指数的计算方法,指导了化学降黏驱降黏剂的评价与优选。

参考文献

- [1] 武毅. 辽河油田开发技术思考与建议[J]. 特种油气藏, 2018, 25(6): 96-100.
WU Yi. Consideration and suggestion on development technology for Liaohe Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(6): 96-100.
- [2] 官臣兴, 李继红, 史毅. 稠油开采技术及展望[J]. 辽宁化工, 2018, 47(4): 327-329.
GONG Chenxing, LI Jihong, SHI Yi. Heavy oil recovery technologies and their development trend [J]. Liaoning Chemical Industry, 2018, 47(4): 327-329.
- [3] 蒋琪, 游红娟, 潘竟军, 等. 稠油开采技术现状与发展方向初步探讨[J]. 特种油气藏, 2020, 27(6): 30-39.
JIANG Qi, YOU Hongjuan, PAN Jingjun, et al. Preliminary discussion on current status and development direction of heavy oil recovery technologies [J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2020, 27(6): 30-39.
- [4] 武毅, 李铁军, 赵洪岩, 等. 辽河油田高效开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017: 283-336.
WU Yi, LI Tiejun, ZHAO Hongyan, et al. Efficient development of Liaohe Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017: 283-336.
- [5] 孙江河, 范洪富, 张付生, 等. 提高稠油采收率技术概述[J]. 油田化学, 2019, 36(2): 366-371.
SUN Jianghe, FAN Hongfu, ZHANG Fusheng, et al. Overview of improving heavy oil recovery technology [J]. Oilfield Chemistry, 2019, 36(2): 366-371.
- [6] 苏彦春, 郑伟, 杨仁锋, 等. 海上稠油油田热采开发现状与展望[J]. 中国海上油气, 2023, 35(5): 100-106.
SU Yanchun, ZHENG Wei, YANG Renfeng, et al. Current status and prospect of thermal recovery processes for offshore heavy oilfields [J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(5): 100-106.
- [7] 桑丹, 张俊, 罗珊, 等. 携砂冷采稠油油田提高采收率的研究与实践[J]. 非常规油气, 2023, 10(4): 102-108.
SANG Dan, ZHANG Jun, LUO Shan, et al. Study and practice on enhanced oil recovery of sand-carrying cold producing heavy oil field [J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(4): 102-108.
- [8] 孟祥兵, 孙新革, 罗池辉, 等. 强非均质超稠油SAGD储集层升级扩容数值模拟[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(2): 210-216.
MENG Xiangbing, SUN Xinge, LUO Chihui, et al. Numerical simulation on upgrading and dilation of SAGD ultra-heavy oil reservoirs with high heterogeneity [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(2): 210-216.
- [9] 郑万刚, 初伟, 崔文富, 等. 渗透降黏驱油剂提高采收率机理[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 129-134.
ZHENG Wangang, CHU Wei, CUI Wenfu, et al. Enhanced oil recovery mechanism of permeable viscosity-reducing oil displacement agent [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 129-134.
- [10] 束青林, 郑万刚, 张仲平, 等. 低效热采/水驱稠油转化学降黏复合驱技术[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(6): 12-21.
SHU Qinglin, ZHENG Wangang, ZHANG Zhongping, et al. Chemical viscosity reduction compound flooding technology for low-efficiency thermal recovery/water flooding heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(6): 12-21.
- [11] 李伟忠. 胜利油田稠油未动用储量评价及动用对策[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 63-71.
LI Weizhong. Evaluation and development countermeasures for nonproducing reserves of heavy oil reservoirs in Shengli Oilfield

- [J]. *Special Oil & Gas Reservoir*, 2021, 28(2): 63-71.
- [12] 周林碧, 秦冰, 李伟, 等. 国内外稠油降黏开采技术发展与应用[J]. *油田化学*, 2020, 37(3): 557-563.
ZHOU Linbi, QIN Bing, LI Wei, et al. Development and application of heavy oil viscosity reduction technology at home and abroad [J]. *Oilfield Chemistry*, 2020, 37(3): 557-563.
- [13] SUN Jianghe, ZHANG Fusheng, WU Yanwei, et al. Overview of emulsified viscosity reducer for enhancing heavy oil recovery [J]. *Materials Science and Engineering*, 2019, 479(12): 1-6.
- [14] 束青林, 魏超平, 于田田, 等. 稠油开发技术进展及新分类标准建立与应用实践——以胜利油田稠油开发为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2024, 14(4): 529-540.
SHU Qinglin, WEI Chaoping, YU Tiantian, et al. Development technology progress of heavy oil and establishment and application practice of new classification standard: a case study of development of heavy oil in Shengli Oilfield [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2024, 14(4): 529-540.
- [15] 魏超平, 束青林, 吴光焕, 等. 敏感性普通稠油水驱油藏化学降黏实践[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(2): 109-115.
WEI Chaoping, SHU Qinglin, WU Guanghuan, et al. Practice of chemical viscosity reduction in water flooding for sensitive conventional heavy oil reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoir*, 2023, 30(2): 109-115.
- [16] 戚俊领, 张贵才, 裴海华. 胜利油田普通稠油乳化驱油体系研制及性能评价[J]. *油田化学*, 2022, 39(1): 115-120, 162.
QI Junling, ZHANG Guicai, PEI Haihua. Development and performance evaluation of emulsifying flooding system for normal heavy oil in Shengli Oilfield [J]. *Oilfield Chemistry*, 2022, 39(1): 115-120, 162.
- [17] 魏超平, 李伟忠, 吴光焕, 等. 稠油降黏剂驱提高采收率机理[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(2): 131-136.
WEI Chaoping, LI Weizhong, WU Guanghuan, et al. EOR mechanism of viscosity reducer flooding in heavy oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(2): 131-136.
- [18] LIU Zupeng, WU Guanghuan, WEI Chaoping. Physical experiments and numerical simulations of viscosity reducer flooding for ordinary heavy oil [J/OL]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 192, 107194-1-107194-7. <https://doi.org/10.1016/j.petrol>.
- [19] 王凯, 周文胜, 王泰超, 等. 高效水溶性稠油降黏剂的优选及性能评价[J]. *油田化学*, 2019, 36(1): 152-156.
WANG Kai, ZHOU Wensheng, WANG Taichao, et al. Laboratory study on viscosity reducing properties of water-soluble solvent for heavy oil [J]. *Oilfield Chemistry*, 2019, 36(1): 152-156.
- [20] 杨祖国, 高秋英, 任波, 等. 稠油油藏储层冷采用活性分子的性能评价与应用[J]. *油田化学*, 2021, 38(1): 101-107.
YANG Zuguo, GAO Qiuying, REN Bo, et al. Performance evaluation and application of cold production active polymer using in heavy oil reservoir [J]. *Oilfield Chemistry*, 2021, 38(1): 101-107.
- [21] 王旭东, 张健, 施雷庭, 等. 稠油活化剂降黏机理及驱油效果研究[J]. *特种油气藏*, 2020, 27(6): 133-138.
WANG Xudong, ZHANG Jian, SHI Leiting, et al. Study on viscosity reduction mechanism and oil displacement effect of heavy oil activator [J]. *Special Oil & Gas Reservoir*, 2020, 27(6): 133-138.
- [22] BAEK K H, ARGUELLES V F J, OKUNO R, et al. Emulsification of athabasca bitumen by organic alkali: Emulsion phase behavior and viscosity for bitumen/brine/triethylenetetramine [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 168(5): 359-369.
- [23] 何永清, 鲁霖懋, 周其勇, 等. 适合中深层稠油油藏的两亲性稠油乳化降黏剂的制备及性能评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(5): 160-167.
HE Yongqing, LU Linmao, ZHOU Qiyong, et al. Preparation and performance evaluation of amphiphilic emulsified viscosity reducer for medium-deep heavy oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(5): 160-167.
- [24] 葛际江, 王东方, 张贵才, 等. 稠油驱油体系乳化能力和界面张力对驱油效果的影响[J]. *石油学报: 石油加工*, 2009, 25(5): 690-696.
GE Jijiang, WANG Dongfang, ZHANG Guicai, et al. The effect of emulsifying power and interfacial tension on displacement characteristics for displacement systems of heavy crude oil [J]. *Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section*, 2009, 25(5): 690-696.
- [25] 姚光明, 何刚, 郭程飞, 等. 剪切作用对乳状液性能及提高采收率的影响[J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 665-671.
YAO Guangming, HE Gang, GUO Chengfei, et al. Effect of shear action on emulsion properties and enhanced oil recovery [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(4): 665-671.
- [26] 刘鹏, 王业飞, 张国萍, 等. 表面活性剂驱乳化作用对提高采收率的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(1): 99-102.
LIU Peng, WANG Yefei, ZHANG Guoping, et al. Study of emulsification effect on oil recovery in surfactant flooding [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(1): 99-102.
- [27] 石静, 于群, 潘斌林, 等. 稠油降黏驱油剂通用技术条件: Q/SH1020 2871—2021[S]. 东营: 胜利石油管理局, 2021.
SHI Jing, YU QUN, PAN Binlin, et al. General technical requirements for viscosity reducing and oil displacement agents for heavy oil: Q/SH1020 2871-2021 [S]. Dongying: Shengli Petroleum Administration Bureau, 2021.

编辑 刘北羿