文章编号:1000-4092(2021)03-453-06

吉7井区稠油自乳化特征分析*

谢建勇,石 彦,褚艳杰,李 旭,刘娟丽,韩晓程

(中国石油新疆油田分公司准东采油厂,新疆 阜康 831511)

摘要:吉7井区深层稠油油藏采用水驱开发,生产过程中乳化现象普遍,为了了解乳化作用对开发效果的影响,对吉7井口产出液的乳化特征进行了分析,通过滤纸润湿法判断产出液类型,采用水中氯离子含量的变化判断乳化发生的时机,并通过显微镜镜下观察乳状液液滴粒径分布评价其稳定性。实验表明,吉7原油具有特殊的乳化性能,在没有添加外来乳化剂的情况下,油水之间能够实现快速自发乳化,乳化发生的时机早,乳化液含水率高,液滴分散均匀,接近微乳液尺寸,具有良好的稳定性,黏度较乳化前提高2.23倍,有利于形成稳定的水驱前缘,可大幅度提高水驱采收率,与生产实际相吻合。吉7井区初期方案预测采收率只有15%,目前油田采出程度已接近20%,综合含水稳定在40%,乳化作用使实际开发效果远远好于预测。图6表4参20

关键词:产出液;乳化时机;乳液黏度;含水率;液滴粒径;自乳化;水驱效果

中图分类号:TE357.46 **文献标识码**:A **DOI**:10.19346/j.cnki.1000-4092.2021.03.013

0 前言

目前国内外研究普遍认为乳化对提高采收率有重要作用,W/O型乳状液是一种提高采收率的有效驱替液,如何形成稳定的乳状液成为研究的重点[1-10]。对于水驱开发油藏,在开采过程中只要有油水存在,就有生成乳化液的可能,但要形成稳定的乳状液却具有一定的难度[11]。新疆油田吉7井区属于中深层稠油油藏,油藏埋深1300~1800 m,油层温度50 ℃,平均孔隙度19.53%,平均渗透率85×10^{-3} μm^2,50 ℃地面原油黏度100.5~17 027.0 mPa·s。目前该区块采用常温注水开发,初期方案预测的最终采收率为15%,而目前阶段采出程度已接近20%,综合含水稳定在40%左右,开发效果远好于预测。按以往的经验认为,由于油水流度比过大,稠油水驱开采过程中会出现黏性指进或舌进,导致含水快速上升,水驱波及效率低[12],但是吉7井区的开采效果偏离了以往的认识规律。目前关于乳化液提高采收率的研究很多,大多是基于室内人工配制乳液开展实验研究,对实际井口产出液的乳化现象缺少相应的分析描述。结合前人的研究成果,为了明确乳化对开发效果的影响,选取具有代表性的54口生产井,对吉7井区现场稠油井口产出液的乳化特征进行分析,对进一步研究利用乳化作用提高稠油油藏采收率具有重要意义。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

硝酸银、铬酸钾,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;碳酸钠、硫酸,分析纯,天津市风船化学试剂科技有限公司;油漆工业用溶剂油,新疆中泰化学股份有限公司;去离子水,自制;实验用油为吉7井区54口井原油样品,50 ℃地面脱气原油黏度142.8~8092 mPa·s;油田地层水,$NaHCO_3$型,矿化度11595.7 mg/L,主要离子质量浓度(单位mg/L)为:Ca^{2+} 138.5、K^++Na^+ 4266.6、Mg^{2+} 28.0、Cl^- 6204.28、

* 收稿日期:2020-04-27;修回日期:2020-10-16。

作者简介:谢建勇(1968—),男,高级工程师,中国石油大学(华东)石油与天然气工程专业工程硕士(2012),从事油气田开发与管理,电话:0994-8368505,E-mail:xiejy@petrochina.com.cn。石彦(1970—),女,高级工程师,从事油田开发提高采收率工作,通讯地址:831511 新疆阜康市石油基地准东采油厂专家工作室,电话:0994-3831463,E-mail:shiyan1@petrochina.com.cn。

SO_4^{2-} 18.1、HCO_3^- 893.82，pH值为7.05；油田注入水，矿化度3398.26 mg/L，主要离子质量浓度（单位 mg/L）为：Ca^{2+} 24.98、K^++Na^+ 1230.82、Mg^{2+} 7.53、Cl^- 1965.35、SO_4^{2-} 71.34、HCO_3^- 98.24，pH值为6.72。

DV-Ⅲ旋转黏度计，美国 Brookfield 公司；DSX510型光学显微镜，日本Olympus公司。

1.2 实验方法

（1）乳状液类型判断

将乳状液滴在滤纸上，静置30 min后观察。如果乳状液是水包油型乳状液（水为外相），则水很快会在吸水滤纸上渗出，表现为液滴周围有水环出现；如果乳状液是油包水型乳状液（油为外相），则在吸水滤纸上形成油斑而没有水环出现，由此可以快速判断乳状液类型。

（2）氯离子含量测定

参照中国石油天然气行业标准 SY/T 5523—2016《油田水分析方法》，采用莫尔滴定法分别测定地层水、注入水以及井口产出水中的氯离子含量。

（3）原油及乳状液中的含水量测定

参照国家标准 GB/T 8929—2006《原油水含量测定 蒸馏法》，使用由玻璃蒸馏烧瓶、冷凝管、带刻度的接收器和加热器组成的蒸馏仪器分别测定原油及乳状液中的含水量。

（4）黏度测定

参照中国石油天然气行业标准 SY/T 0520—2008《原油黏度测定 旋转黏度计平衡法》，用DV-Ⅲ旋转黏度计在50 ℃下分别测定乳状液及脱水原油的黏度。

（5）乳状液镜下观察及粒径测定

将乳状液均匀涂在载玻片上，使用DSX510三维数码光学显微镜观察乳状液形态，测定微粒的粒径及其分布。

2 结果与讨论

2.1 吉7井口产出液的状态

吉7井口产出液以乳状液形式存在，采用滤纸润湿法可以快速测定乳状液的类型。将吉7井和其它不同区块共6口井的井口产出液（含水均在35%左右）分别滴在同一张滤纸上，静置30 min后对比观察，并以水作参照物。吉7井区的几个油样没有水渗出的现象，而其他的几口井的产出液很快就有水渗出。静置8 h后，有水渗出的几口井的产出液在滤纸上油水界面清晰，外围有明显的水环，而吉7井区产出液则没有，由此可以判断吉7井口产出液为油包水型乳状液。

2.2 乳化发生时机

乳化发生的时机对于驱油效率的影响极大。油水在地层、井筒流动过程中受到各种剪切、拉伸作用以及温度、压力的变化，会促进原油与水形成乳状液。通常认为原油从井底到井口的搅动作用最强，这个过程最易于发生乳化，而在地层流动过程中并不会很快乳化，因而稠油水驱时更容易发生注入水指进现象，表现为含水上升速率快，无水采油期和中低含水采油期短，最终采收率低。如果油水在地层流动过程中早期就发生乳化，乳状液就能快速参与驱油、调控流度，形成稳定的驱替前缘，起到扩大水驱波及体积的作用。经测定，吉7井区地层水中氯离子含量平均为6204.28 mg/L，注入水中氯离子含量较低，平均为1965.35 mg/L。该区单井注水量为10～20 m^3/d，与地层水体积相比注入量较小，若注入水进入地层后与原油接触很快形成乳状液，注入水与地层水发生离子交换较少，那么产出液中氯离子含量应该与注入时变化不大，略有增加但远低于地层水的含量，反之若注入水进入地层后与原油形成乳状液的时间较晚，注入水与地层水发生充分的离子交换，则氯离子含量应该相对较高，接近地层水中氯离子的含量。经检测，井口乳状液中的氯离子含量平均为2581.21 mg/L，略高于注入水中氯离子含量。这说明吉7井区注入水与原油一经接触即快速发生乳化，形成乳状液参与驱油，乳化发生时间早，乳化能力强。

2.3 乳化程度及乳液稳定性

通常情况下，虽然产出液从井口流出时可能呈乳化状态，但通过静置沉降后大多会发生油水分层。然而吉7井口产出的乳状液在长时间静置后仍不发生分层现象，井口取样在常温静置30 d后也没有游离水析出，乳化液很稳定。

为获得更清晰的认识，对现场不同黏度、不同含水范围的54口生产井取样进行分析，经测定该批井口产出液的含水范围 2.99%～94.89%，平均 39.35%，黏度 142.8～8092 mPa·s（50 ℃），平均 1577.31 mPa·s。将产出液模拟地层温度在50 ℃水

浴中静置24 h后分别测定游离水和乳状液含量，分离游离水后测量乳状液的黏度和含水，计算游离水与乳状液各自占比以及样品的综合含水，测量脱水原油黏度。

2.3.1　产出液的乳化情况

吉7原油的乳化现象很普遍，54个样品全部都有乳化液，只是乳化液占比随着含水变化而变化。产出液的综合含水和乳化液占比关系见图1。由图1可以看出，综合含水在40%以下时，井口产出液表现为完全乳化状态，基本不含游离水。随着综合含水的升高，产出液开始出现游离水，乳化液占比逐渐降低，乳化液占比与综合含水负相关。但是即便综合含水超过80%以后，依然存在着W/O型乳化液。

54口生产井的脱水原油黏度从142.8 mPa·s到8092 mPa·s（50 ℃）不等，从原油黏度与产出液中乳化液占比的关系图可以看出（见图2），乳化液占比的高低与原油黏度没有相关性，不同黏度的原油均可形成乳化液，再次说明吉7井区原油极易发生乳化，乳化状态与含水有关，而与原油的黏度没有明显关系。

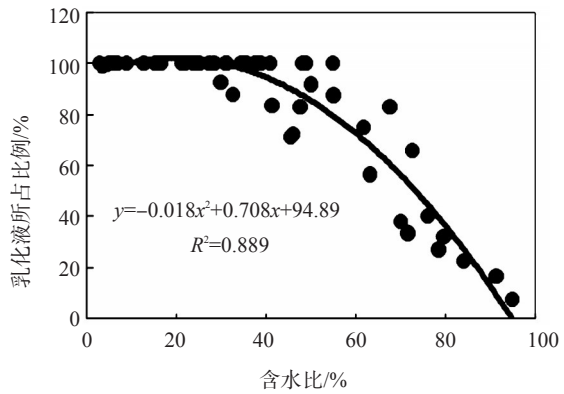

图1　产出液综合含水与乳化液占比的关系

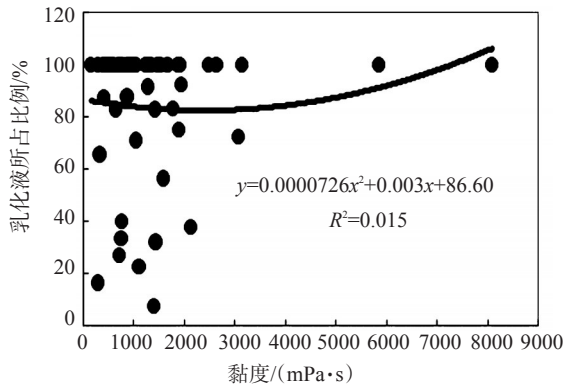

图2　原油黏度与乳化液占比的关系（50 ℃）

2.3.2　乳化液的持水率

在相同条件下，W/O型乳状液中分散在原油中的水量有一定的限度，超过这个限度水就难以稳定存在，而会析出形成游离水，这个限度就是乳状液能包容的最大水量，定义为持水率。用乳化液的持水率可以反映原油的乳化能力，在相同条件下持水率越高，原油的乳化能力越强，乳化程度越高。对于水驱油藏，乳化液持水率的高低对于驱油作用有很大的影响。如果注入水进入地层后与原油形成乳状液的持水率高，被稳定包裹的水量越多，剩余游离水就越少，就不容易产生水窜现象，有利于提高采收率。吉7井口产出液中乳化液含水普遍比较高，表明该区原油乳化能力强，乳化程度高。产出液综合含水与乳化液含水关系见图3。由图3可知，随着产出液综合含水的升高，乳化液含水随之升高，当产出液的综合含水超过60%以后，乳化液含水开始出现拐点，游离水增多，乳化液的含水率降低，乳化液最高含水可达61%，即吉7井口产出液的最高持水率为61%。

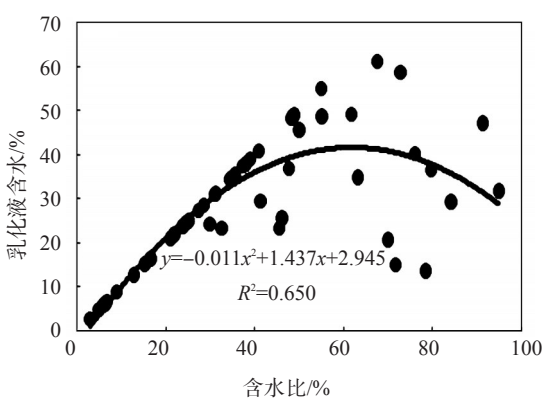

图3　产出液综合含水与乳化液含水关系

将脱水原油黏度与乳状液含水率进行分类统计，得出不同黏度的原油持水率情况，结果如表1所示。由表1可以看出，原油黏度在1000 mPa·s以内时，乳化液最高含水率可以达到61%，随着原油黏度的增加，乳化液最高含水率逐步下降，说明吉7原

表1　乳化液最高含水率统计表

原油黏度/(mPa·s)	乳化液最高含水/%
<1000	61
1000～2000	50
>2000～8000	40
>8000	35

油的持水率受黏度影响，黏度越高持水率越低。

2.3.3 乳化液的黏度

原油乳化形成W/O型乳状液，其表观黏度会增大，作为驱替液黏度高于原油，可以有效地改善油水流度比，增大驱替压力，提高驱油效率[13]。由吉7井口产出液测定得出，乳状液黏度比脱水原油黏度增加了0.83～7.26倍，平均增加2.23倍，且以W/O型乳状液存在，成为有利的原油驱替液。乳化后黏度增加倍数与乳化液含水关系如图4所示。可以看出随着乳化液含水升高，乳化液黏度增大，黏度增加幅度与乳化液含水正相关。

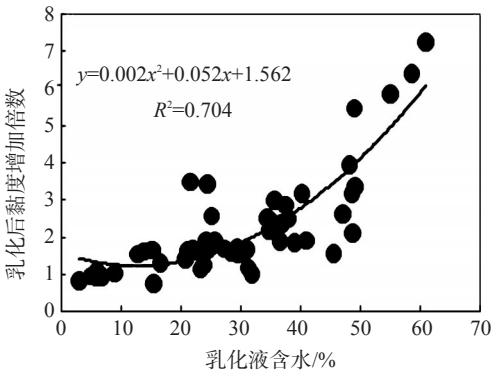

图4 乳化液含水与乳化后黏度增加倍数关系图

由于储层存在非均质性，在水驱过程中，注入水更容易进入高渗透层，导致高渗层含水饱和度相对较高，容易造成指进，影响驱油效率。由于乳化液黏度增加幅度与乳化液含水正相关，在含水高的高渗透层形成的乳化液黏度相对更高，增加了流动阻力，乳状液自发起到调控非均质性的作用，可以有效改善驱油效果。

2.4 乳化液的微观形貌

将J1366井油样（含水35%）涂于载玻片上，在高倍显微镜下使用1000倍物镜进行观测并拍照（见图5），可以看到液滴颗粒数量多，以平面密堆积型排列，基本不移动，液滴直径主要分布（见表2）在0～1.0 μm之间，占比达到90.2%。

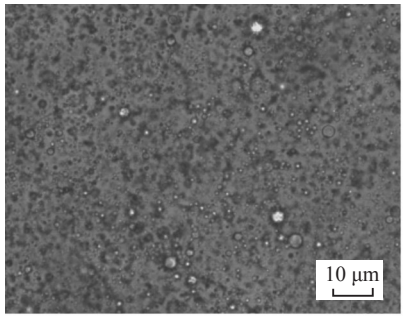

图5 原油乳化液的显微图片

表2 原油乳化液滴粒径分布

粒径范围/μm	比例/%	粒径范围/μm	比例/%
0～0.4	10.5	>0.8～0.9	9.5
>0.4～0.5	16.2	>0.9～1.0	7.6
>0.5～0.6	18.6	>1.0～2.0	8.5
>0.6～0.7	15.1	>2.0～3.0	0.4
>0.7～0.8	12.7	>3.0	0.9

与常见的原油乳化状态不同，吉7原油乳化液液滴尺寸较小，分散更均匀，具备微乳液的多种特性。微乳液一般由表面活性剂、助表面活性剂、油和水组成，分散相质点很小，在食品、燃料、化学等许多领域有广泛应用[14]，我们常用的化妆品乳液属于微乳液，选取一种常见化妆品乳液在显微镜下观察，乳化颗粒分布均匀，颗粒大小相对集中，液滴直径为0.9～1.6 μm。通过对比可以看出，吉7原油乳化液液滴尺寸接近化妆品乳液的，即吉7原油乳化液接近微乳液状态，与常见的稠油乳状液有所不同。

采用显微镜观察不同黏度的井口产出乳化液并测量乳化液颗粒的粒径，统计结果见表3。乳化液的液滴直径越小，大小越统一，其分散程度越均匀，乳化液的稳定性就越好，从表3可知，吉7产出液的液滴粒径在0.67～1.42 μm范围，分布范围很窄，且液滴大小分布与原油黏度没有相关性，不同的黏度原油都能形成粒径较小的乳化液，呈现出接近微乳液的稳定状态。

表3 不同的黏度原油所形成乳状液的粒径

产出液	50 ℃地面原油黏度/(mPa·s)	含水/%	平均粒径/μm
1#	1774	48.34	0.67
2#	1873	31.14	1.42
3#	2252	37.61	1.03
4#	3045	22.77	1.13
5#	5120	23.77	0.72
6#	10462	32.36	0.73

2.5 乳状液自乳化特征分析

关于乳状液的形成和稳定性的理论有很多相关研究，通常认为，要形成稳定的乳状液必须有乳化剂的存在，虽然原油中含有天然乳化剂，但很难

形成稳定的乳状液参与驱油，需要添加外来乳化剂，因而康万利等提出了利用自发乳化驱油的方法[15-17]。通过对吉 7 井口产出液的乳化状态分析可以看出，吉 7 井区原油自乳化特征与上述自发乳化的定义不同，是在没有加入外来乳化剂的情况下，在地层渗流过程中自发实现快速乳化，从而形成稳定的乳状液，避免了水驱油藏利用乳化作用提高采收率的高成本难题。

为了了解吉 7 井区稠油的特殊性，对其四组分进行分离，与其他两个类似稠油油田相比较[18]，结果如表 4 所示。从表 4 可以看出，几种稠油的四组分含量接近，并无明显差别。

表 4　几种稠油的四组分分析

稠油	饱和烃含量/%	芳香烃含量/%	胶质含量/%	沥青质含量/%
吉 7 稠油	28.68	28.06	37.56	5.70
孤岛稠油	26.07	28.49	41.65	3.38
辽河稠油	25.08	31.39	34.08	6.65

大量研究认为，原油中的有机酸、胶质、沥青质以及油中所含微细固体颗粒等都是天然的乳化剂，在驱替过程中能引起乳化作用[19-20]。将煤油中加入吉 7 井区地层水配制成含水 35%的基础油，然后分别加入吉 7 稠油中分离出的蜡、饱和烃、芳香烃、胶质、沥青质和石油酸配制成一系列模拟油，进行乳化实验及乳化液性质测定，实验结果表明，原油单组分对乳化作用的影响分别为石油酸＞沥青质＞胶质＞饱和烃≈芳香烃＞蜡。由于乳化行为的复杂性，关于吉 7 稠油自乳化的特殊性还需要进一步开展深入研究。

2.6　现场生产情况

吉 7 井区稠油具有特殊的自乳化特征，形成稳定的乳状液。对于注水开发来说，乳状液的稳定性极为重要，原油自乳化后可形成稳定的驱替液，作为水驱前缘控制流度比，保证注入水稳步推进，避免水窜现象的发生，有效扩大驱油面积。吉 7 井区自投入注水开发八年以来，油田综合含水始终保持稳定，2019 年在 8 口注水井上实施了微地震法水驱前缘监测，由结果拟合图可以看出（见图 6），虽然该区渗透率极差达到 131，储层非均质性较强，水驱前缘还是比较稳定，注入水向四周推进，没有明显的单向突进，波及面积较大，油井多方向见效，与实际生产情况相吻合。

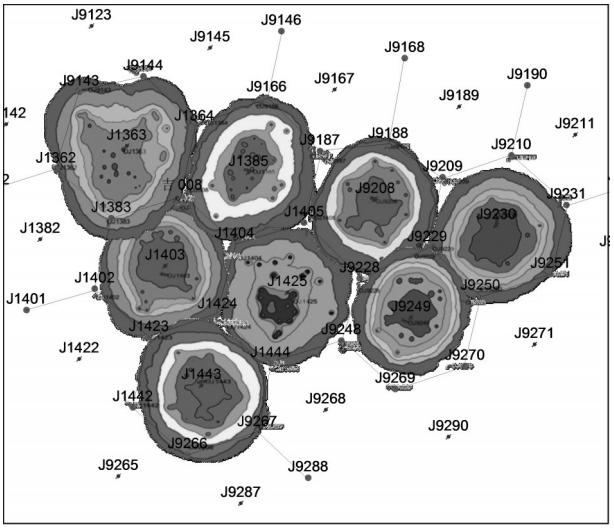

图 6　微地震水驱前缘监测图

吉 7 稠油油藏目前水驱效率高，与其特殊原油易乳化形成稳定的亚微米结构有密切关系，尤其是乳化液性能不受原油黏度的影响，对于吉 7 井区更高黏度区域可实现水驱开发具有重要意义。

3　结论

吉 7 井区油井采出液为稳定的油包水型乳化液，最高含水率可达到 61%，在地面原油黏度 142.8～10462 mPa·s 的范围内，持水率随原油黏度增加从 61%降至 35%。

吉 7 原油在没有添加外来乳化剂的情况下遇水易发生乳化，乳化发生时机早，有利于快速形成乳化液参与驱油，这是该区注水效果好的主要原因。

吉 7 井口产出的乳化液粒径主要分布在 0～1 μm，接近微乳液状态，具有良好的稳定性，且乳化液性能不受原油黏度的影响。

在含水 2.99%～94.89%范围内，原油乳化后黏度平均升高 2.23 倍，乳状液在水驱过程中具有调控水流通道、扩大水驱波及体积的作用。乳化液的驱油效率高，在吉 7 井区的生产实践中得到了验证。

参考文献：

[1]　李世军，杨振宇，宋考平，等. 三元复合驱中乳化作用对提高采收率的影响[J]. 石油学报，2003，24(5)：71-73.

[2]　刘奕，张子涵，廖广志，等. 三元复合驱乳化作用对提高采收率影响研究[J]. 日用化学品科学，2000，23(S1)：124-127.

[3]　雷征东，袁士义，宋杰，等. 三元复合体系乳状液渗流对采收

率影响[J]. 辽宁工程技术大学学报：自然科学版，2009，28(S1)：77–78.
[4] 蒲万芬，梅子来，杨洋，等. 高含水高温油藏W/O型乳化剂OB-2性能评价及驱油研究[J]. 油气藏评价与开发，2019，9(1)：38–43.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 李杰瑞，刘卫东，周义博，等. 化学驱及乳化研究现状综述[J]. 应用化工，2018，47(9)：1957–1961.
[8] 李星. 乳化程度对三元复合驱提高采收率的影响[J]. 化学工程与装备，2016(5)：54–57.
[9] 周亚洲，殷代印，曹睿，等. 高含水后期乳状液的驱油效果与作用机理分析[J]. 油田化学，2016，33(2)：285–290.
[10] 徐晓丽，王业飞，李丹丹，等. 乳化性能差异对中低渗岩心驱油效果的影响[J]. 断块油气田，2013，20(3)：388–391.
[11] 江延明，李传宪. W/O乳状液的流变性研究[J]. 油气储运，2000，19(1)：10–12.
[12] 荆文波，张娜，孙欣华，等. 鲁克沁油田深层稠油注水开发技术[J]. 新疆石油地质，2013，34(2)：199–201.
[13] 王凤琴，曲志浩，孔令荣，等. 利用微观模型研究乳状液驱油机理[J]. 石油勘探与开发，2006，33(2)：221–224.
[14] 王笃政，王鹏，刘晓逾，等. 微乳化技术及应用进展[J]. 化学中间体，2011，8(9)：6–8.
[15] 康万利，刘述忍，孟令伟，等. 自发乳化微观驱油机理研究[J]. 石油天然气学报，2009，31(3)：99–102.
[16] 康万利，张立东，吴军政，等. 自发乳化驱油方法I：自发乳化驱油配方研究[J]. 石油天然气学报，2005，27(2)：351–352.
[17] 康万利，贾红兵，吴军政，等. 自发乳化驱油方法II：自发乳化驱油试验研究[J]. 石油天然气学报，2005，27(6)：910–912.
[18] 白金美. 稠油组分及乳化剂对油水界面性质影响的研究[M]. 青岛：中国石油大学(华东)，2009.
[19] 陈汝熙，郑文儒，沈颖兰，等. 碱水驱油原油中乳化活性组分的研究[J]. 油田化学，1988，5(2)：121–128.
[20] 任朝华，罗跃，汪庐山，等. 原油乳化剂及原油乳化驱油技术研究[J]. 精细石油化工进展，2015，16(4)：12–15.

Analysis of Self-emulsifying Characteristics of Heavy Oil in Ji 7 Area

XIE Jianyong, SHI Yan, CHU Yanjie, LI Xu, LIU Juanli, HAN Xiaocheng
(*Zhundong Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Fukang, Xinjiang 831511, P R of China*)

Abstract: The deep heavy oil reservoir in Ji 7 area is developed by water flooding, and the emulsion phenomenon is common during development process. In order to understand the effect of emulsification on the development, the emulsification characteristics of the produced fluid were analyzed, the wetting types of produced fluid was determined through by the filter paper method, and emulsifying time was judged by analysis of the change of chloride ion content in water, the emulsion droplet size distribution was observed under a microscope lens and its stability was evaluated. Experimental results showed that the crude oil in JI 7 had special emulsification property. That is, the oil and water could be emulsified spontaneously and quickly even if without the addition of emulsifiers. The emulsifying time was early, the water content of emulsion was high, and the droplet dispersion was uniform and the size was close to that of microemulsion, exhibiting good stability. The viscosity of the emulsion was 2.23 times higher than crude oil before emulsification, which was favorable for forming stable water drive front, and greatly improving water drive recovery. The recovery rate was predicted to be 15%, however, the current recovery degree was nearly 20% and the comprehensive water cut was kept at 40%. It was obvious that self-emulsification made the actual development effect far better than predicted.

Keywords: *output liquid*; *emulsification time*; *emulsion viscosity*; *water cut*; *droplet size*; *self-emulsifying*; *water flooding efficiency*