



缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气致稠机理研究

刘中云 李兆敏 赵海洋

Research on Crude Oil Thickening Mechanisms during Nitrogen Injection in Fracture-Cavity Carbonate Reservoirs

LIU Zhongyun, LI Zhaomin, ZHAO Haiyang

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏量化注水开发技术

Quantitative Water Injection Technology for Cavernous Fractured Karst Carbonate Reservoirs in the Tahe Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(2): 104–107 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019122>

伊拉克库尔德A油田原油注氮欠平衡钻井技术

Under-Balanced Drilling Technique Using Nitrogen Injection into Crude Oil in Oilfield A of Iraq Kurdistan

石油钻探技术. 2021, 49(2): 32–36 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021002>

塔河油田溶洞型碳酸盐岩油藏注入氮气垂向分异速度及横向波及范围研究

Study on Vertical Differential Velocity and Transverse Scope of Nitrogen Injection in Carbonate Reservoirs with Fractures and Vugs in the Tahe Oilfield

石油钻探技术. 2019, 47(4): 75–82 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019092>

塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏气水复合驱技术

Gas-Water Composite Flooding Technology for Fractured and Vuggy Carbonate Reservoirs in Tahe Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(1): 61–65 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019124>

鱼骨刺柔性管在碳酸盐岩缝洞型油藏应用的数值模拟研究

Numerical Simulation of Fishbone Flexible Pipes in Fractured Vuggy Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2017, 45(3): 102–106 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201703018>

缝洞型碳酸盐岩储层压裂效果评价方法试验研究

An Experimental Study on Evaluation Methods for Fracturing Effect of Fractured-Vuggy Carbonate Reservoir

石油钻探技术. 2020, 48(6): 88–93 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020074>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀油气开发▶

doi:10.11911/syztjs.2021015

引用格式: 刘中云, 李兆敏, 赵海洋. 缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气致稠机理研究 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 75-80.

LIU Zhongyun, LI Zhaomin, ZHAO Haiyang. Research on crude oil thickening mechanisms during nitrogen injection in fracture-cavity carbonate reservoirs [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 75-80.

缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气致稠机理研究

刘中云¹, 李兆敏², 赵海洋³

(1. 国家石油天然气管网集团有限公司, 北京 100728; 2. 中国石油大学(华东), 山东青岛 266580; 3. 中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘 要: 为了明确缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气原油变稠的机理并制定相应的开发对策, 提高注氮气的采收率, 开展了缝洞型油藏注氮气致稠机理研究。该研究通过注氮气模拟试验, 分析了氮气抽提作用、氮气含氧量和伴注水对原油黏度的影响。结果表明, 氮气含氧是引起原油黏度增大的主导因素, 含氧量为 1% 时, 仅需 2 d 多即可将氧气耗尽, 黏度达到 18 000 mPa·s, 为初始黏度的 6 倍; 含氧量为 5% 时, 在 7 d 多时间内黏度持续升高达到 1 122 000 mPa·s, 为初始黏度的 366 倍。乳化含水和抽提对原油黏度的影响相当, 黏度升高 1~3 倍。研究表明, 提高注入氮气的纯度是防止塔河油田缝洞型油藏注氮气致稠的最有效方法, 研究结果为解决缝洞型碳酸盐岩油藏注氮气原油致稠问题提供了理论依据。

关键词: 缝洞型油藏; 注氮气; 变稠机理; 抽提; 原油乳化; 原油氧化

中图分类号: TE344, TE357.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)05-0075-06

Research on Crude Oil Thickening Mechanisms during Nitrogen Injection in Fracture-Cavity Carbonate Reservoirs

LIU Zhongyun¹, LI Zhaomin², ZHAO Haiyang³

(1. National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd, Beijing, 100728, China; 2. China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong, 266580, China; 3. Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: Research was conducted on the thickening mechanism of crude oil during nitrogen injection in fracture-cavity reservoirs to clarify the thickening mechanism and take corresponding countermeasures, thereby enhancing the oil recovery of nitrogen injection. In this study, simulation experiments of nitrogen injection were performed to analyze the influence on crude oil brought by nitrogen extraction, oxygen content in nitrogen, and mixed water. The experiments showed that the oxygen content in nitrogen was the major influential factor. When the oxygen content was 1%, it took only more than 2 days to exhaust the oxygen, and the viscosity reached 18 000 mPa·s, which was 6 times the initial viscosity. When the oxygen content increased to 5%, the viscosity continued to grow to 1 122 000 mPa·s within more than 7 days, which was 366 times the initial viscosity. Emulsification with water and nitrogen extraction resulted in the same effect on viscosity: the viscosity increased 1–3 times. The results demonstrate improving the purity of injected nitrogen is the most effective way to prevent crude oil thickening of fracture-cavity reservoirs during nitrogen injection in Tahe Oilfield. It has provided a theoretical basis for solving the problem of crude oil thickening brought by nitrogen injection in fracture-cavity carbonate reservoirs.

Key words: fracture-cavity reservoir; nitrogen injection; thickening mechanism; nitrogen extraction; crude oil emulsification; crude oil oxidization

2012 年, 塔河油田开展了单井注氮气矿场试验, 并取得了较好的效果; 目前, 注氮气提高采收率

技术已成为塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏继注水后主要的增产技术手段^[1-4]。但随着单井注氮气吞吐

收稿日期: 2020-05-13; 改回日期: 2021-07-21。

作者简介: 刘中云(1963—), 男, 湖北钟祥人, 1983 年毕业于江汉石油学院采油工程专业, 2003 年获中国科学院广州地球化学研究所地球化学专业博士学位, 教授级高级工程师, 主要从事油气田开发工程技术研究与管理工。E-mail: liuzhongyun@pipechina.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“塔里木盆地碳酸盐岩油气田提高采收率关键技术示范工程”(编号: 2016ZX05053)资助。

轮次的增多,部分井原油变稠,导致掺稀比升高、转抽异常,影响了油井的正常生产。

刘笑春等人^[5-7]研究证实,原油注入CO₂后,烷烃先减少后增多,非烃和沥青质先增多后减少,原油组分在低温(35℃)下略有升高,高温下无明显变化,上述结果符合CO₂混相驱油机理,原油物性发生变化是CO₂抽提机理和CO₂萃取机理共同作用的结果;侯剑锋等人^[8-10]研究认为,含氧空气对原油有氧化作用,致使原油的流变性发生变化;A. R. Montes等人^[11-12]研究认为,原油乳化转型(W/O)严重影响了乳化降黏的效果,导致生产及输送困难;塔河油田注氮气效果调研表明,为降低注入压力,注氮气过程中一般都伴注水。同时,现场施工设计要求注入氮气纯度大于99%,但现场检测结果表明,氮气纯度一般为94%~99%。

笔者基于文献和现场调研,在借鉴前人试验方法和思路的前提下,通过注氮气模拟试验,分析了氮气抽提作用、氮气含氧量和伴注水对原油黏度的影响。研究结果对解决注氮气原油致稠问题有一定的指导作用。

1 氮气抽提对原油黏度影响试验研究

1.1 试验设备和方法

利用注氮气超临界抽提模拟试验装置,模拟多次注气后,氮气注入量、原油品质和注气速度等因素对原油抽提作用的影响。注氮气超临界抽提模拟试验装置主要由气动增压泵(耐压60 MPa)、氮气抽提装置(耐温200℃)、空气压缩机(50 MPa)和可控温分离釜(-20℃)等组成,如图1所示。

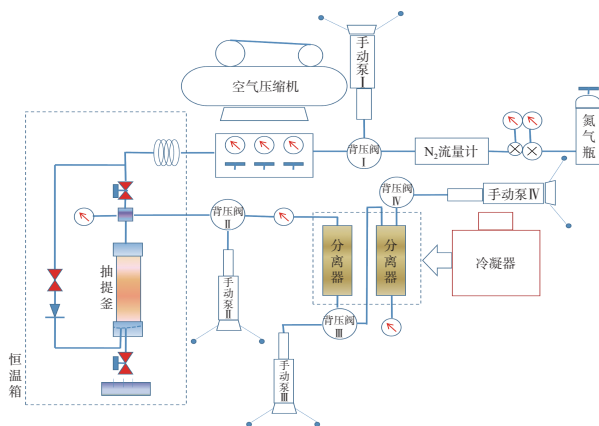


图1 注氮气超临界提抽模拟试验装置

Fig.1 Simulation device for supercritical extraction of injected nitrogen

向抽提釜中加入一定质量的油样,打开氮气瓶阀门,系统压力达到45 MPa、温度达到120℃后,恒温恒压3 h。打开空气压缩机、增压机出气阀、氮气瓶,开始N₂抽提试验,记录试验开始的时间 t_1 、初始气量为 Q_1 ,当累计注入氮气体积达到 $Q_1 + \Delta Q$ ($\Delta Q = NmR_g$; N 为 m g油样溶解气的体积倍数,下面简称为氮气注入倍数; m 为油样质量,g; R_g 为油样气油比,L/g)时,关闭氮气瓶、空气压缩机和增压机出气阀,结束试验并记录时间 t_2 ,分别打开分离器2与分离器1的底阀接出抽提产物;最后待抽提泄压至3.0 MPa,打开抽提釜底阀,接出经N₂抽提后的油样,测定其黏度。

试验用原油为塔河油田不同区块的地面原油,其基本性质见表1。从表1可以看出,饱和组分和芳香组分含量的差别不大,胶质和沥青质含量的差别较大,而胶质和沥青质含量是影响原油黏度的主要因素。

表1 试验用原油初始黏度

Table 1 Initial viscosity of crude oil in the experiment

油样	组分含量, %				重均相对分子质量	黏度/(mPa·s)	
	饱和	芳香	胶质	沥青质		50℃	130℃
油样A	27.35	32.28	24.10	16.28	1 081	4 570	68.6
油样B	29.13	31.18	27.75	11.94	1 081	3 540	62.5
油样C	30.81	31.22	17.38	20.59	1 064	370	20.4
油样D	32.31	31.13	18.58	18.01	1 087	961	37.1

1.2 不同因素对氮气抽提影响分析

1.2.1 原油油样

试验条件同1.1节,其中氮气注入倍数为10倍,油样A、B、C和D初始性质见表1,其余同上,考察氮气抽提作用对于不同原油的影响。油样A、B、C和D的氮气抽提量见表2。

表2 不同油样对抽提效果的影响

Table 2 Influence of different oil samples on extraction

油样	质量/g	注入速度/(L·min ⁻¹)	注入量/L	抽提量/g	质量占比, %
油样A	72.70	2.96	221.74	0.12	0.17
油样B	75.70	3.00	230.88	0.12	0.16
油样C	109.10	2.97	332.76	0.12	0.11
油样D	83.19	2.99	253.73	0.07	0.08

从表2可以看出:不同油样经过氮气抽提后,均存在一定的抽提量,可见对于不同性质的原油,氮气均具有抽提作用^[13-14]。

1.2.2 氮气注入倍数

试验条件同 1.1 节, 其中氮气注入倍数分别注入 3, 5, 10 和 30 倍, 油样 A 的初始性质见表 1, 其余同上, 考察在氮气不同注入倍数下, 氮气抽提作用对于原油的影响。油样 A 经不同倍数氮气抽提后的抽提量和黏度如表 3 所示。

表 3 氮气注入倍数对油样 A 抽提效果的影响
Table 3 Influence of nitrogen injection multiples on extraction in Sample A

油样质量/g	注入速度/(L·min ⁻¹)	注入倍数	抽提量/g	质量比, %	50 ℃黏度/(mPa·s)	增黏倍数
72.95	2.90	3	0.05	0.07	5 026	1.10
99.63	2.98	5	0.11	0.11	5 519	1.21
72.70	2.96	10	0.12	0.17	6 701	1.47
63.35	2.97	30	0.27	0.43	14 933	3.27

从表 3 可以看出: 随着氮气注入倍数增大, 抽提量逐渐增多, 黏度逐渐升高; 当氮气注入倍数为 30 倍时, 抽提质量比达到 0.43%, 抽提的黏度为抽提前的 3.27 倍。

1.2.3 氮气注入速度

试验条件同 1.1 节, 其中氮气注入倍数为 30 倍, 油样 A 的初始性质见表 1, 其余同上, 考察在不同的注入速度下, 氮气抽提作用对于原油的影响。油样 A 经过氮气抽提后的抽提量如表 4 所示。

表 4 注入速度对原油抽提效果的影响
Table 4 Influence of nitrogen injection rates on extraction

油样质量/g	注入速度/(L·min ⁻¹)	注入量/L	抽提量/g
63.35	2.97	579.65	0.27
63.35	3.49	579.65	0.25
63.35	4.07	579.65	0.24

从表 4 可以看出: 在氮气注入量相同的条件下, 随着注气速度增大, 氮气抽提量减少, 当注气速度为 4.07 L/min 时, 氮气的抽提量为 0.24 g。

2 氮气含氧量对原油黏度影响试验研究

塔河油田现场注氮气施工中, 氮气纯度一般在 94%~99%, 为了研究氮气含氧量对地层原油黏度的影响, 选取含氧量 1%, 5% 和 15% 的氮气进行试验, 其中含氧量 15% 试验是通过极端情况来表征原油氧化致稠的幅度^[15-18]。

2.1 试验设备和方法

氮气含氧量和氧化时间对原油性质影响主要包括以下 2 个方面:

一是对原油黏度的影响。采用高温氧化试验装置研究其对原油黏度的影响程度, 试验设备主要有气动增压泵、手动泵、温度控制仪、DZF-6020 真空干燥箱、旋转片式真空泵、高温高压反应釜和分离器, 试验流程如图 2 所示。

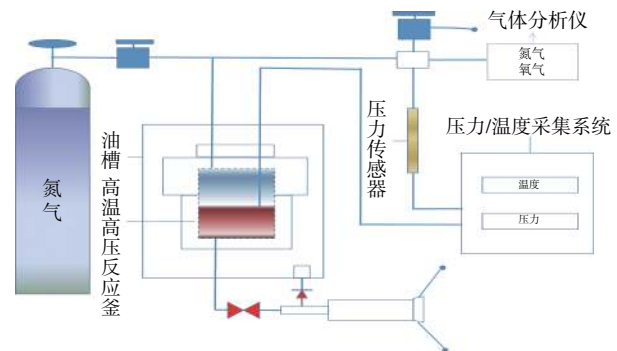


图 2 高温氧化试验流程

Fig.2 Procedures for a high-temperature oxidization experiment

高温氧化试验步骤为: 配制设计要求的 N₂/O₂ 混合气体, 并增压至高压状态。高温高压反应釜抽真空, 密闭转入油样。利用配制好的 N₂/O₂ 混合气体吹扫流程, 转入高压气体。将高温高压反应釜的温度和压力压至设定的 130 ℃、50 MPa, 记录氧化反应时间; 试验完毕取样, 测试氧化反应后原油的黏度和含氧量。

二是对原油组分的影响。试验设备主要包括高温炉、热导池、电位差计和积分仪。试验考察含氧量和氧化时间对原油组分的影响, 即 C, H 和 N 元素含量和原油组分的变化情况。

C, H 和 N 的测定方法为^[18-19]: 试样在高温炉中分解后, 转变成测定的形态 (CO₂, H₂O, N₂ 和 CO), 然后以氦气载入色谱柱进行分离, 依次进入热导池, 产生与各自含量成比例的电子信号, 分别用电位差计和积分仪进行记录, 按照所得数据和标准样品得到相应值, 计算各元素的含量。原油四组分的测定方法为: 用正己烷沉淀、过滤岩石中的可溶有机物或原油中的沥青质溶液, 其滤液分别采用不同极性的有机溶剂进行淋洗, 依次获取饱和烃、芳香烃和胶质溶液; 将各族组分溶液中的溶剂挥发至恒重, 记录其质量, 计算得到试样中各族组分的质量分数, 即可以得到原油四

组分含量。

2.2 含氧量和氧化时间对原油性质的影响

2.2.1 对原油黏度的影响

油样 E 的初始黏度 3 060 mPa·s, N₂/O₂ 混合气体

的含氧量分别为 1%、5% 和 15%, 氧化时间设定为 6, 12, 30, 54, 78, 126 和 174 h。在 50 ℃ 下, 测定油样 E 在不同含氧量氮气中氧化不同时间后的黏度, 结果如表 5 所示。

表 5 油样 E 在不同含氧量氮气中氧化不同时间后的黏度

Table 5 Viscosity of Sample E after oxidization for different time in nitrogen with different oxygen contents

含氧量, %	油样E氧化不同时间后的黏度/(mPa·s)						
	6 h	12 h	30 h	54 h	78 h	126 h	174 h
1	10 020	12 600	15 480	17 750	18 200	18 300	18 000
5	12 500	35 330	62 000	98 400	228 000	453 000	1 122 000
15	55 630	384 000	9 360 000	32 750 000			

含氧量为 1% 时, 约 54 h 后氧气耗尽, 黏度达到最大值 18 000 mPa·s, 为初始黏度的 6 倍; 含氧量为 5% 时, 氧化 174 h 后, 原油黏度升高为 1 122 Pa·s, 为初始黏度的 366 倍; 含氧量为 15% 时, 黏度呈指数升高, 氧化 54 h 后原油黏度达到 32 750 Pa·s, 之后黏度超出设备量程。由此可见, 在塔河油田油藏温度 130 ℃、压力 50 MPa 条件下, 氧气能够导致原油黏度大幅度升高。

2.2.2 对原油组分的影响

采用油样 E 进行氧化试验, 其初始黏度为 3 060 mPa·s, N₂/O₂ 混合气体的含氧量分别为 1%、5% 和 15%, 油样 E 经不同含氧量氮气氧化抽提后, 其 C, H 和 N 元素含量变化如表 6、图 3 和图 4 所示。

表 6 油样 E 经不同含氧量氮气氧化前后 C, H 和 N 元素含量的变化

Table 6 Change of contents of Element C, H and N in Sample E before and after oxidization by nitrogen with different oxygen contents

油样	H, %	C, %	N, %	S, %	O, %
油样E	11.95	85.13	0.51	1.80	0.61
含氧量1%氮气抽提3次	11.80	84.99	0.51	1.84	0.86
含氧量1%氮气抽提7次	11.78	84.94	0.51	1.86	0.91
含氧量5%氮气抽提3次	11.66	84.71	0.51	1.89	1.23
含氧量5%氮气抽提7次	11.49	84.36	0.49	1.86	1.85

从表 6 可以看出, 原油在经过高温氧化后, 发生了加氧、去氢和去碳的化学反应, 在油藏条件(温度 130 ℃、压力 50 MPa)下氧气能够导致原油黏度大幅度升高; 从图 3 和图 4 可以看出, 不同含氧量的氮气均能使原油中的饱和组分和芳香组分减少, 胶质和

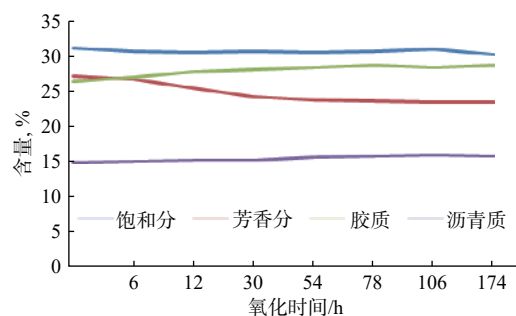


图 3 油样 E 在氧气含量 1% 下的组分变化情况

Fig. 3 Change of components in Sample E with an oxygen content of 1%

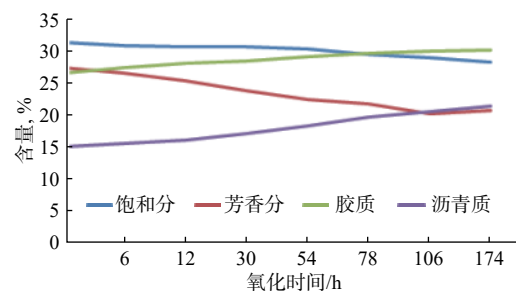


图 4 油样 E 在氧气含量 5% 下的组分变化情况

Fig. 4 Change of components in Sample E with an oxygen content of 5%

沥青质明显增多, 含氧量越高, 沥青质含量增加越多。

3 伴注水对原油黏度影响试验研究

塔河油田缝洞型油藏注氮气过程中, 单纯注气压力一般大于 45 MPa, 目前 50 MPa 的压缩机无法满足单纯注气需要, 因此需要通过气水混注来降低

注气压力, 而伴注水对原油具有乳化效应, 原油乳化后黏度会升高^[19-21]。

3.1 试验设备和方法

乳化含水主要包括 2 个试验: 1) 室内反向乳化试验, 研究塔河原油乳化含水对原油黏度的影响。采取连续配制不同含水样品的方法, 加入一定质量的塔河油田原油, 计算出制备 10% 含水样品所需加水量, 先制备出含水 10% 的样品, 在此基础上依次制备含水 20%, 30%, ..., 75% 等 6 个样品, 采用蒸馏法测定不同含水样品的真实乳化含水率, 并测试制备的乳状液在 50 ℃ 下的黏度。2) 室内模拟现场注氮气伴水流程, 研究在实际的气水比条件下原油能否乳化及含水变化情况。根据《稠油油藏高温相对渗透率及驱油效率测定方法》(SY/T 6315—2017) 的相关技术要求, 填制岩心并测液相渗透率, 将填制岩心接入线性模型, 模型入口端连接 2 个中间容器, 分别装有地层水和脱水原油, 用泵顶替, 2 个泵的流量比设为某一特定值, 注入油水的同时, 注入氮气, 测定岩心两端的压差、产出的油水样测黏度及乳化含水率(分析乳状液的形态)。

3.2 乳化含水对原油致稠试验分析

3.2.1 乳化含水对原油黏度影响

试验选取塔河油田 TK1 井和 TK2 井的油样进行反向乳化试验。试验前测定 TK1 井油样的含水率为 5.51%, 脱水黏度为 329 mPa·s; TK2 井油样的含水率为 4.65%, 黏度为 1 880 mPa·s。然后制备乳化含水样品, 测其 50 ℃ 温度下的黏度(见表 7 和表 8)。

表 7 TK1 原油乳化含水样品黏度
Table 7 Viscosity of emulsified water-bearing samples from Well TK1

原油乳化含水率, %	真实含水率, %	50 ℃原油黏度/(mPa·s)
原始样	5.51	385
10	9.82	575
20	14.35	1 420
30	27.41	4 337
45	44.38	22 590
60	56.06	273 000
70	62.55	449 000
75	67.34	212 000

试验结果表明, 随着掺入地层水量不断增多, 掺水原油的黏度也是不断升高; 掺水量小于 30%, 非

表 8 TK2 原油乳化含水样品黏度
Table 8 Viscosity of emulsified water-bearing samples from Well TK2

原油乳化含水率, %	真实含水率, %	50 ℃原油黏度/(mPa·s)
原始样	4.65	1 880
10	9.16	2 480
20	20.8	7 500
30	33.45	13 200
40	40.1	22 800
55	53.0	44 000
65	63.5	109 000
70	67.2	78 800

常容易形成 W/O 乳状液, 黏度升高 6~13 倍; 掺水量大于 60% 时, 形成 W/O 乳状液的黏度甚至升高 100 倍以上。W/O 乳状液转相点在 60%~65%, 同时脱水原油黏度越低, 越容易形成 W/O 乳状液, 且乳状液黏度的升幅越大。

3.2.2 伴注水对原油乳化影响

试验验证在油田实际注氮气伴水的条件下, 原油与伴注水能否形成乳状液及原油黏度升高倍数, 试验流程见 3.1 节。试验结果表明, 在接近注氮气施工现场油水比条件时, TK3 井和 TK4 井原油的黏度升高 1~3 倍左右, 即在实际现场生产情况下, 伴注水对原油的乳化增黏影响不大。

4 结 论

1) 室内试验结果表明, 氮气的抽提作用会使原油黏度增加, 随着氮气注入量增大, 抽提量逐渐增多, 黏度逐渐升高; 随着氮气注入速度增大, 氮气的抽提量逐渐减少。

2) 油藏中有氧气存在时, 会发生加氧、去氢和去碳等化学反应, 使原油黏度升高, 饱和组分和芳香组分减少, 胶质特别是沥青质明显增多; 含氧量越高, 沥青质含量增加越多, 因此现场施工中必须严格控制注入氮气的纯度。

3) 塔河油田原油 W/O 乳状液转相点含水率为 60%~65%, 同时脱水原油黏度越低, 越容易形成 W/O 乳状液, 且乳状液黏度的升幅越大。现场生产情况下, 伴注水对原油的乳化增黏影响不大。

参 考 文 献

References

- [1] 杨景斌, 侯吉瑞. 缝洞型碳酸盐岩油藏岩溶储集体注氮气提高采收率实验[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(6): 107-114.
YANG Jingbin, HOU Jirui. Experiments on enhancing oil recovery by nitrogen injection in fracture-vuggy carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 107-114.
- [2] 关华, 郭平, 赵春兰, 等. 渤海湾盆地永安油田永66区块氮气驱油机理[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 149-160.
GUAN Hua, GUO Ping, ZHAO Chunlan, et al. Nitrogen flooding mechanism in Yong66 Block of Yong'an Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(2): 149-160.
- [3] 姜海涛. 救援井与事故井连通技术研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014.
JIANG Haitao. Study on the Technology of Intercommunicating the relief well and the accident well[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2014.
- [4] WANG Leizheng, YU Wei. Gas huff and puff process in Eagle Ford Shale: recovery mechanism study and optimization[R]. SPE 195185, 2019.
- [5] 刘中云, 赵海洋, 王建海, 等. 塔河油田溶洞型碳酸盐岩油藏注入氮气垂向分异速度及横向波及范围研究[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(4): 75-82.
LIU Zhongyun, ZHAO Haiyang, WANG Jianhai, et al. Study on vertical differential velocity and transverse scope of nitrogen injection in carbonate reservoirs with fractures and vugs in the Tahe Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(4): 75-82.
- [6] 刘笑春, 黎晓草, 杨飞涛, 等. 长庆姬塬油田黄3区CO₂驱对采出原油物性影响[J]. 油气藏评价与开发, 2019, 9(3): 36-40.
LIU Xiaochun, LI Xiaoxiang, YANG Feitao, et al. Effect of CO₂ flooding on physical properties of produced crude oil in Huang 3 Block of Jiyuan Oilfield, Changqing[J]. Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development, 2019, 9(3): 36-40.
- [7] YU Wei, LASHGARI H R, SEPEHRNOORI K. Simulation study of CO₂ huff-n-puff process in Bakken tight oil reservoirs[R]. SPE 169575, 2014.
- [8] 唐人选, 梁珀, 吴公益, 等. 苏北复杂断块油藏二氧化碳驱油效果影响因素分析及认识[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 98-103.
TANG Renxuan, LIANG Po, WU Gongyi, et al. Analyzing and understanding the influencing factors of CO₂ flooding in the Subei complex fault block reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(1): 98-103.
- [9] 侯剑锋, 刘鹏刚, 曹廷义. 轻质原油注空气热特征及氧化动力学研究[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(4): 113-118.
HOU Jianfeng, LIU Penggang, CAO Tingyi. Study on thermal characteristics and oxidation kinetics of light crude oil by air injection[J]. Oil and Gas Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 113-118.
- [10] 龙安林, 张茂林, 宋惠馨, 等. 减氧空气驱低温氧化反应机理研究: 以尕斯库勒油田E₃¹油藏为例[J]. 能源与环境, 2020, 42(4): 105-109.
LONG Anlin, ZHANG Maolin, SONG Huixin, et al. Study on mechanism of low temperature oxidation reaction of deoxidized air drive: taking E₃¹ reservoir of Gaskule Oilfield as an example[J]. Energy and Environmental Protection, 2020, 42(4): 105-109.
- [11] 廖广志, 王红庄, 王正茂, 等. 注空气全温度域原油氧化反应特征及开发方式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 334-340.
LIAO Guangzhi, WANG Hongzhuang, WANG Zhengmao, et al. Characteristics and development methods of crude oil oxidation reaction in the whole temperature range of air injection[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 334-340.
- [12] 张地平. 地下电磁定位测距方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
ZHANG Diping. Research on location method of underground electromagnetic positioning[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [13] MONTES A R, GUTIERREZ D, MOORE R G, et al. Is high pressure air injection (HPAI) simply a flue-gas flood?[R]. SPE 133206, 2010.
- [14] REN S R, GREAVES M, RATHBONE R R. Air injection LTO process: an IOR technique for light-oil reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 2002, 7(1): 90-99.
- [15] CLARA C, DURANDEAU M, QUENAULT G, et al. Laboratory studies for light oil air injection projects: potential application in Handil Field[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(3): 239-248.
- [16] 王伟伟. 压力对轻质原油氧化动力学参数的影响[J]. 断块油气田, 2020, 27(1): 109-112.
WANG Weiwei. Influence of pressure on oxidation kinetic parameters of light crude oil[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(1): 109-112.
- [17] 李一波, 蒲万芬, 王爱香, 等. 轻质油藏注空气低温高压氧化实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(6): 90-92.
LI Yibo, PU Wanfen, WANG Aixiang, et al. Experimental study on low temperature high pressure oxidation in air injection in light oil reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(6): 90-92.
- [18] 文江波, 罗海军, 柯兰茜, 等. 流动剪切对原油乳化含水率的影响及基于焓的定量表征[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(11): 104-107.
WEN Jiangbo, LUO Haijun, KE Lanxi, et al. Effect of flow shear on water content of crude oil emulsion and quantitative characterization based on enthalpy[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(11): 104-107.
- [19] 黄咏梅, 赵宏伟, 盖云飞. 薄层低渗透断块稠油氮气分散降黏增产技术研究与应用[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2020, 17(2): 71-77.
HUANG Yongmei, ZHAO Hongwei, GAI Yunfei. Research and application of technology of reducing viscosity and increasing production of heavy oil by nitrogen dispersion in the fault block reservoir with thin layer and low permeability[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(2): 71-77.
- [20] ZHANG Lijun, CHENG Shiqiang, YU Haili. Analysis of pressure transient for fractured-vuggy reservoirs with coupling of pipe flow and seepage[C]. International Symposium on Multi-Field Coupling Theory of Rock and Soil Media and Its Applications, 2010: 313-317.
- [21] 张晓, 李小波, 荣元帅, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏周期注水驱油机理[J]. 复杂油气藏, 2017, 10(2): 38-42.
ZHANG Xiao, LI Xiaobo, RONG Yuanshuai, et al. Mechanism of cyclic water flooding in fractured-vuggy type carbonate reservoir[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(2): 38-42.

[编辑 滕春鸣]