

渤海 B 油田油井堵塞机理分析及防治对策研究

方 涛 白健华 尚宝兵 陈华兴 吴华晓 庞 铭

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

摘 要:针对渤海 B 油田 D 井区油井频繁堵塞、严重影响正常生产的问题,在堵塞物组分分析基础上,开展了沥青质沉积高压模拟等室内实验和蜡沉积、沥青质沉积相包络线理论预测,结果表明井筒存在蜡与沥青质复合沉积、近井地带存在沥青质沉积,温度和压力变化是导致有机质沉积的主要原因。为此,提出了“井筒升温+地层保压”相结合的治理策略。研发应用适合电潜泵井的井筒空心杆电加热工艺,井口温度提升至 60 ℃ 以上;优化注采关系,将七采一注调整为五采三注,地层压力保持程度由最低 72% 增加至 94%。2 口因堵塞长期停产的油井恢复了正常生产,2 口井产量有所上升,所有井没有再出现井筒堵塞现象,治理效果显著。研究成果为易发生蜡和沥青质沉积油田的高效开发提供了技术借鉴,具有指导意义。

关键词:蜡沉积;沥青质沉积;电潜泵井;空心杆电加热;保压开采;注采调整

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.05.011

Analysis on blocking mechanism and prevention measures for Bohai B oilfield

FANG Tao, BAI Jianhua, SHANG Baobing, CHEN Huaxing, WU Huaxiao, PANG Ming

CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China

Abstract: This paper is presented to address the issue of the frequent blockage in the D block of Bohai B oilfield, which seriously affected its normal production. Based on the composition analysis of blockage, some laboratory experiments, such as high-pressure simulation of asphaltene deposition, and theoretical prediction of wax deposition and asphaltene deposition phase envelope were carried out. The results showed that there existed a combination of wax deposition and asphaltene deposition in wellbore and asphaltene deposition around near-well zone. Temperature and pressure changes were the main causes. And for that, the treatment strategy of increasing temperature in wellbore and maintaining pressure in formation was proposed. To increase the temperature, the hollow rod electric heating technology suitable for electric submersible pump(ESP) wells was introduced, and the wellhead temperature was raised to above 60 ℃. In order to maintain pressure, the injection-production system was optimized as well. The injection-production system of 7 production wells with 1 injection wells turned into 5 production wells with 3 injection wells and the formation pressure increased from the lowest 72% of the original formation pressure to 94% of that. Two wells that had been shut down for a long time due to blockage in wellbore have resumed normal production, and another two wells produce more than before. No blockage in wellbore occurs again, proving that a remarkable effect is achieved. The research can provide technical reference for the efficient

收稿日期:2021-12-14

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058)

作者简介:方 涛(1988-),男,四川资阳人,工程师,硕士,主要从事采油工程方案设计、井筒工艺及储层保护技术研究与应用工作。E-mail: 782611012@qq.com

development of oilfields prone to wax and asphaltene deposition, and has important guiding significance.

Keywords: Wax deposition; Asphaltene deposition; Electric submersible pump wells; Hollow rod electric heating; Pressure maintaining recovery; Injection-production adjustment

0 前言

在石油开采过程中,随着油、气、水从地层流入井筒,地层、井筒的温度和压力不断变化,井流物系统的稳定性受到破坏。当达到一定条件时,原油中蜡、沥青质等有机质和地层水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子形成的 CaCO_3 等无机质会沉积于地层和井筒中,影响油气井产能,甚至导致停产。国内外学者针对井筒沉积问题做了相关研究,主要集中在井筒堵塞原因分析^[1-3]及相适应的化学解堵药剂筛选评价与应用^[4-6],但缺乏复杂多类型沉积机理及主动防治措施的探索和研究。

渤海 B 油田 D 井区井筒堵塞问题频发,以往针对该区块主要采取以“治”为主的应对策略。投产以来先后实施钢丝作业、自生热解堵、加热车洗井、连续油管清蜡、有机解堵等措施 90 余次,井筒堵塞问题未能得到彻底解决,单井产能受到较大影响,开发效果不理想。本文通过室内实验和理论预测,明确了该井区油井堵塞原因及机理,提出了“以防为主”的综合防治措施并在现场应用,成功解决了油井堵塞问题,对相似油田高效开发具有很好的指导意义。

1 研究区概况

渤海 B 油田位于渤海东部辽东湾海域,构造位于辽中凹陷中段的中洼反转带,被郯庐走滑断裂的辽中 1 号大断层分为东、西两块。D 井区位于 B 油田东块,于 2011 年底投产,生产东二段,储层埋深 1 300 ~ 1 470 m,平均原始地层压力 13.9 MPa,地层温度 57 ℃。

地层原油饱和压力 10.4 MPa,地饱压差小;地层原油密度为 893.2 kg/m³,单脱气死油密度为 945.1 kg/m³;井流物平均分子量为 250.0 g/mol, C36 以上组分分子量为 679.5 g/mol;地层原油黏度 50.9 mPa·s,属于稠油范畴。地面原油平均含蜡量 7.0%,胶质含量 17.5%,沥青质含量 4.3%,密度为 937.0 kg/m³, 50 ℃下黏度 200 ~ 600 mPa·s,凝固点在 -4 ℃以下;旋转黏度计无法测出原油析蜡点,差示扫描量热法测试析蜡点在 28 ~ 37 ℃之间。

D 井区采用注水开发,早期部署 7 口生产井和 1 口注水井,见图 1。投产 5 a 后,地层亏空较大,地层压力保持程度为 72%。开发过程中,油井反复表现出井底流压上升、产量下降的动态特征,生产波动大,产量递减快, B3、B4 井甚至常年无产出关停。自生热解堵、加热车洗井等措施实施后,油井堵塞问题不仅没有得到彻底解

决,修井液漏失还造成一定程度的储层伤害,油井产能恢复程度也不理想。

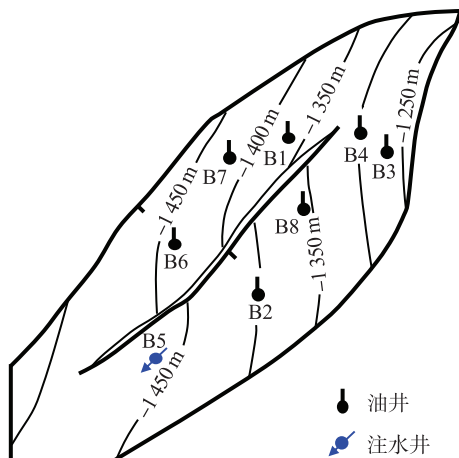


图 1 D 井区早期布井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of early well layout in Well D

2 井筒堵塞物分析

2.1 化学组分分析

根据 CJ/T 221—2005《城市污水处理厂污泥检验方法》和 GB/T 6531—1986《原油和燃料油中沉淀物测定法(抽提法)》标准方法,分析堵塞物主要成分为油质有机物,含量 99.95%,含水 0.05%,不含 CaCO_3 垢、泥沙等无机质。采用 SY/T 5119—2008《岩石中可溶有机物及原油族组分分析》和 SY/T 7550—2012《原油中蜡胶质沥青质含量的测定》标准方法,分析堵塞物中沥青质和蜡含量分别为 42.23% 和 20.73%,较原油中含量大幅增加,表明井筒堵塞的主要原因是蜡和沥青质沉积。

2.2 模拟蒸馏分析

对原油和堵塞物进行模拟蒸馏分析,堵塞物初馏点为 227.6 ℃,远高于原油初馏点 77.8 ℃;在 700 ℃以下,堵塞物收率低于油样;在高于 700 ℃时,堵塞物收率高于油样,表明堵塞物的中—重质组分含量较原油有所增加,见图 2。

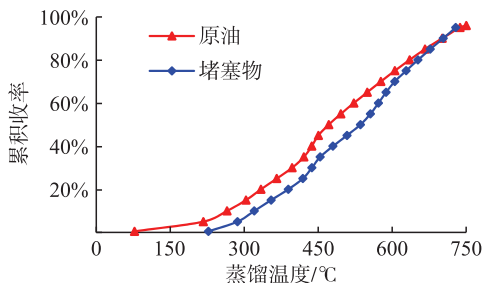


图 2 模拟蒸馏分析结果图

Fig. 2 Simulated distillation analysis

2.3 化学元素分析

一般地,原油中 C、H 含量变化不大,但 N、O、S 等有机杂原子和 Al、Fe 等金属杂原子含量差异较大,主要集中于胶质和沥青质组分中。这些杂原子和 C、H 相比含量并不高,但对原油及其组分的性质却有很大影响^[7],会导致沥青质电荷不平衡,使沥青质分子产生极性。沥青质的极性越大,其缔合性越大,越容易在溶液中聚集^[8]。采用 SH/T 0715—2002《原油和残渣燃料油中镍、钒、铁含量测定法(电感耦合等离子体发射光谱法)》标准方法,分析堵塞物中 Fe、Ca、Na、K、Mg 等金属杂原子含量较原油中含量增加数十倍至上百倍,见表 1。这些金属杂原子使分子结构复杂化,强化了胶质、沥青质、油蜡网状结构,导致形成的堵塞物也更稳定。

表 1 无机元素组成分析表

Tab. 1 Inorganic elements analysis μg /g

无机元素	含量	
	在油样中	在堵塞物中
Al	<0.1	50.5
Ca	2.4	192.0
Cu	<0.1	7.4
Fe	11.3	833.0
K	3.1	100.0
Mg	0.9	54.7
Na	38.1	461.0
Ni	45.7	20.2
Zn	<0.1	15.7
Pb	<0.1	<0.1
V	<0.1	<0.1

3 有机质沉积机理分析

3.1 原油蜡沉积

D 井区油井产量较低,井筒热量损失大,导致井口产液温度低于析蜡点,存在井筒析蜡问题。根据原油性质和生产动态数据,预测蜡沉积相包络线,见图 3^[9]。预测原油析蜡点在 33 ℃左右,压力对析蜡点影响较小,温度是蜡沉积的主要影响因素之一。井筒中 400 m 以上位置处于蜡沉积相包络线以内,存在析蜡风险。若改变井筒温度场至蜡沉积相包络线以外,可避免井筒蜡沉积。

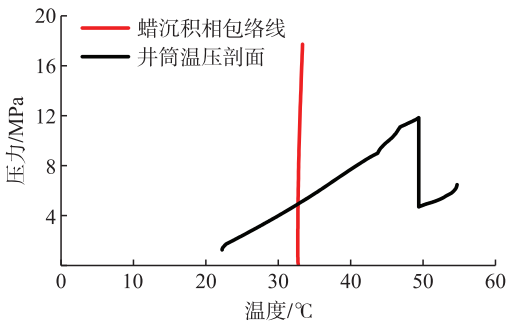


图 3 原油蜡沉积相包络线图

Fig. 3 Phase envelope curve of wax deposition

3.2 原油沥青质沉积

考虑原油组分影响,利用井下原油样品开展了沥青质沉积高压模拟实验^[10],得到不同压力下沥青质生成微观形态,见图 4。原油在饱和压力下已有沥青质沉积发生;随着压力进一步降低,原油组分间的平衡受到影响,累积析出的沥青质颗粒密度增加,沥青质沉积量也逐渐增加。

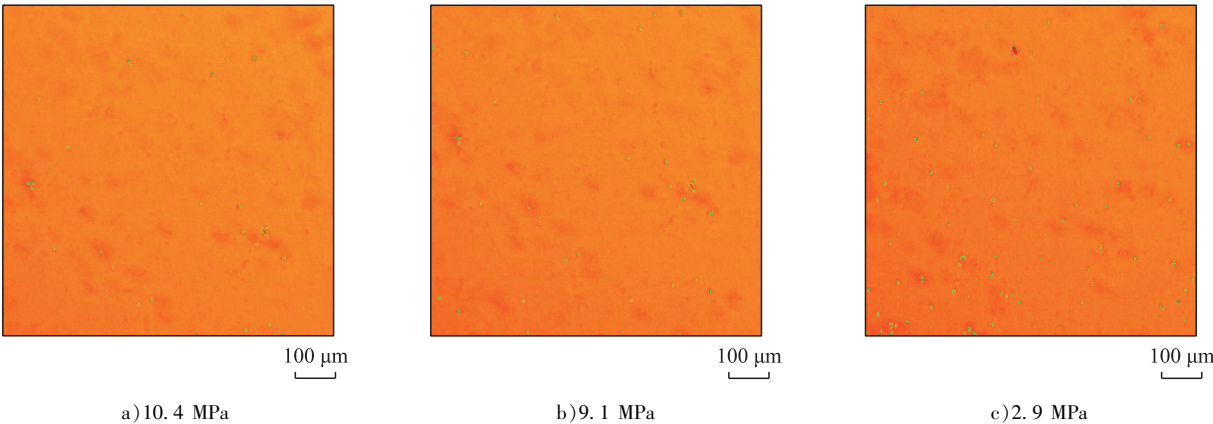


图 4 不同压力下沥青质沉积显微图

Fig. 4 Microscopic image of asphaltene deposition at different pressure

建立 D 井区沥青质沉积相包络线^[11-12],见图 5。井筒部分位置温压曲线在沥青质沉积相包络线以内,存在沥青质沉积风险。投产初期,油藏条件位于沥青质沉积相包络线以外。投产 5 a 后,部分构造高部位井地层压

力低于饱和压力,油藏条件处于沥青质沉积相包络线以内,近井地带存在井筒沥青质沉积风险。若提高近井地带地层压力,改善井筒温度场,可降低沥青质沉积对开发的影响。

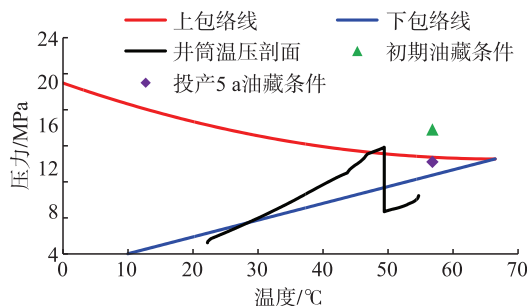


图5 原油沥青质沉积相包络线图

Fig. 5 Phase envelope curve of asphaltene deposition

由此可见, D 井区井筒存在蜡和沥青质复合沉积, 近井地带存在沥青质沉积。沥青质沉积与蜡沉积相互影响、相互制约, 堵塞物还会将原油中的液态烃捕集到形成的有机物网络结构中^[13-14], 导致井筒有机质沉积过程极其复杂。

4 有机质沉积防治对策及应用

结合以往治理措施的经济性和效果, 考虑“以防为主”, 提出了“井筒升温 + 地层保压”相结合的治理策略。通过井筒电加热工艺可大幅提升井筒流体温度, 从而预防井筒有机质沉积; 通过优化注采井网、强化注水恢复地层压力, 则可形成不利于近井地带沥青质析出的条件。

4.1 井筒升温

在陆地杆式泵空心杆电加热工艺的基础上^[15], 研发了适合海上油田电潜泵井的空心杆电加热工艺^[16], 即将抽油杆置于油管内部, 抽油杆底部连接终端器, 终端器与导电座对接, 形成闭合回路; 抽油杆上部与抽油杆悬挂器连接; 抽油杆悬挂器坐挂于油管挂下部的改造双公短节内, 上端与专用偏心免拆井口采油树对接密封; 管柱底部设计采用深井安全阀, 满足海上油田井控要求, 见图 6。

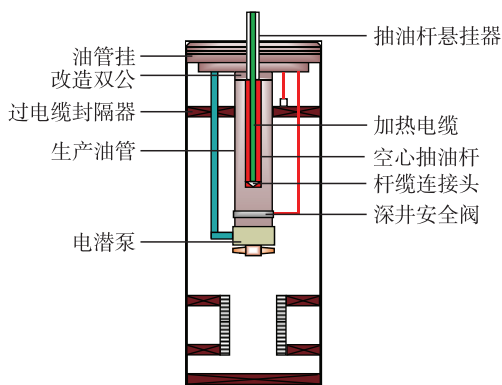


图6 海上油田电泵井空心杆电加热管柱示意图

Fig. 6 Schematic diagram of hollow rod electric heating pipe string for offshore oilfield ESP wells

在 B1 井试验应用空心杆电加热工艺后, 井筒流体温度维持在 43 °C 以上, 远高于析蜡点, 见图 7。井筒上部流体升温更加明显, 井口温度维持在 60 °C 以上, 较正常不加热情况下提升约 33 °C, 不仅防止了蜡晶的析出, 也有效抑制了沥青质在井筒的沉积、聚集^[17-18]。

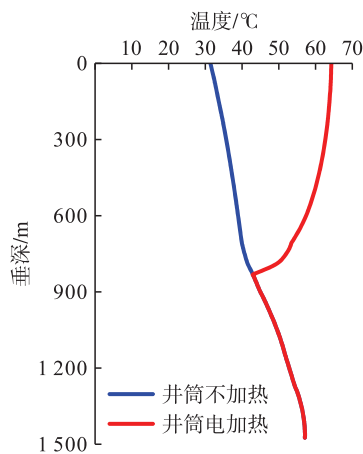


图7 B1 井井筒温度场剖面图

Fig. 7 Temperature field in wellbore of well B1

4.2 地层保压

为对存在沥青质沉积风险的油藏及时补充能量^[19-21], 根据井间连通关系, 先后将 B8 和 B7 两口油井转为注水井, 从而由七采一注调整为五采三注, 并进一步优化 B5 井注水量。井区注采比由 0.21 提升至 0.80, 地层压力逐年恢复, 地层压力保持程度由最低 72% 增加至 94%, 见图 8。

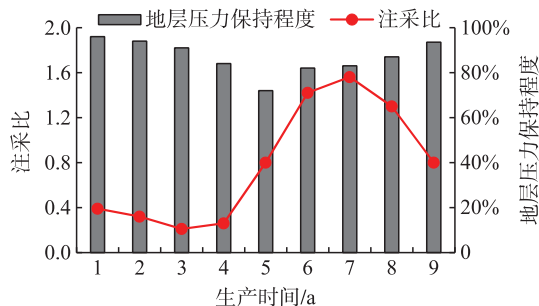


图8 注采比及地层压力保持程度逐年变化情况图

Fig. 8 Variation of injection-production ratio and the formation pressure with production time

综合防治后, B1、B2 井平均日产油有所增加, B3、B4 两口长期停产井也恢复了正常生产, B6 井因含水上产油有所下降, 但所有生产井都没有再出现井筒堵塞问题, 提高了生产时率, 累产油 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$, 治理效果显著, 见表 2。

表 2 有机质沉积防治对策应用效果分析表

Tab. 2 Implement effect analysis of prevention measures for organic material deposition

井号	应用前				应用后				
	地层压力 保持程度	井口温 度 /℃	平均产油 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	措施工 作量 /次	地层压力 保持程度	井口温 度 /℃	平均产油 / ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	措施工 作量 /次	累产油 / 10^4 m^3
B1	72%	<40.2	34.2	24	94%	62	43.6	0	6.4
B2	72%	<45.0	30.8	20	94%	55	35.3	0	1.1
B3	72%	—	—	8	94%	62	61.1	0	2.9
B4	72%	—	—	3	94%	62	30.7	0	1.4
B6	72%	<40.0	21.1	14	94%	51	18.3	0	3.2

5 结论

1)研究认为,影响渤海 B 油田 D 井区油井正常生产的原因是地层温度和压力下降,致使蜡和沥青质复合沉积,造成油井堵塞。

2)研发形成了电潜泵井的空心杆电加热工艺技术,将井筒流体温度提升至析蜡点以上,实现了井筒升温,解决了井筒堵塞问题;通过注采井网调整和优化注水量,提高了注采比,地层压力得到恢复,避免了近井地带沥青质析出。

3)现场应用表明,“井筒升温+地层保压”的治理策略有效解决了渤海 B 油田 D 井区油井堵塞问题。

参考文献:

[1] 陈德飞,孟祥娟,白晓飞,等.油井堵塞物成分及析出位置——以哈 6 区块为例[J].承德石油高等专科学校学报,2018,20(5):6-10.

CHEN Defei, MENG Xiangjuan, BAI Xiaofei, et al. Composition and precipitation site of plugging substances in oil wells——HA 6 Block [J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2018, 20(5): 6-10.

[2] 徐海霞,任利华,卢培华,等.哈得碳酸盐岩油藏井筒异物堵塞原因分析及对策[J].化学工程师,2017,31(1):71-74.

XU Haixia, REN Lihua, LU Peihua, et al. Cause analysis and prevention of wellbore blocking in carbonate reservoirs of Hade oilfield[J]. Chemical Engineer, 2017, 31(1): 71-74.

[3] 董正亮,陈大钧,侯绪林,等.龙岗礁滩气藏气井垢污分析及堵塞机理研究[J].天然气与石油,2014,32(2):49-52.

DONG Zhengliang, CHEN Dajun, HOU Xulin, et al. Analysis on gas well dirt in Longgang reef reservoir and study on its blockage mechanism[J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(2): 49-52.

[4] 伍增贵,鞠斌山,栾志安,等.埕北油田沥青质堵塞综合研

究[J].石油勘探与开发,2000,27(5):98-101.

WU Zenggui, JU Binshan, LUAN Zhi'an, et al. A systematic study of the formation damage caused by asphaltene deposition in Chengbei oil field [J]. Petroleum Exploration & Development, 2000, 27(5): 98-101.

[5] 赵凤兰,鄢捷年.防治原油沥青质沉积处理剂的室内评价[J].石油钻采工艺,2005,27(5):46-48.

ZHAO Fenglan, YAN Jienian. Evaluation of additives on prevent and remove asphaltene deposits [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2005, 27(5): 46-48.

[6] 郭东红,高金强,辛浩川,等.肯基亚克油田盐下油藏 8010 井井筒堵塞机理与解堵技术[J].特种油气藏,2008,15(1):80-83.

GUO Donghong, GAO Jinqiang, XIN Haochuan, et al. Block removing method for well 8010 in subsalt reservoir of Kenjiyak oilfield [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(1): 80-83.

[7] 王子军.石油沥青质的化学和物理 II 沥青质的化学组成和结构[J].石油沥青,1996,10(1):26-36.

WANG Zijun. The chemistry and physics of petroleum asphaltenes: Part II chemical composition and structure of petroleum asphaltenes [J]. Asphalt, 1996, 10(1): 26-36.

[8] 陆阳.重质油沥青质性质与结构的研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2010.

LU Yang. Study on properties and structure of asphaltene from different heavy oil [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.

[9] 法鲁克·西维.油层伤害—原理、模拟、评价和防治[M].杨凤丽,侯中昊,译.北京:石油工业出版社,2003.

CIVAN F. Reservoir formation danmage-fundamentals, modeling, assessment, and mitigation [M]. YANG Fengli, HOU Zhonghao, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.

[10] 舒福昌,张文秀.伊朗 BA 原油沥青沉积及抑制高压模拟实验[J].科学技术与工程,2018,18(28):87-92.

SHU Fuchang, ZHANG Wenxiu. Asphaltene deposition and

- inhibitors for Iranian BA crude oil by high pressure simulation test [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(28): 87-92.
- [11] 王宇飞,陈华兴,刘义刚,等. 沥青质沉积风险预测方法研究及应用[J]. 油田化学, 2018, 35(1): 176-180.
WANG Yufei, CHEN Huaxing, LIU Yigang, et al. Research and application of asphaltene deposition prediction method[J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(1): 176-180.
- [12] 廉培庆,马翠玉,高敏,等. 沥青质沉积特征及控制策略研究进展[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(16): 101-107.
LIAN Peiqing, MA Cuiyu, GAO Min, et al. Recent research progress of asphaltene deposition characteristics and control strategies[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(16): 101-107.
- [13] 谭英杰,鲁镇语,姜卉,等. 沥青质对结蜡作用影响的研究进展[J]. 油田化学, 2018, 35(4): 757-760.
TAN Yingjie, LU Zhenyu, JIANG Hui, et al. Research progress in the influence of asphaltenes on paraffin precipitation [J]. Oilfield Chemistry, 2018, 35(4): 757-760.
- [14] 李传宪,蔡金洋,程梁,等. 沥青质引发的蜡油体系结蜡层分层现象及分层规律[J]. 化工学报, 2016, 67(6): 2426-2432.
LI Chuanxian, CAI Jinyang, CHENG Liang, et al. Stratification phenomenon and laws of wax deposits of waxy oil triggered by asphaltene addition [J]. CIESC Journal, 2016, 67(6): 2426-2432.
- [15] 张朋举,项红军,张佩玉,等. 空心抽油杆电加热采油技术在三塘湖油田的应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(3): 114-116.
ZHANG Pengju, XIANG Hongjun, ZHANG Peiyu, et al. Application of hollow sucker rod electrical heating production technology in Santanghu oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(3): 114-116.
- [16] 周海军,程少华,高永华,等. 空心杆电加热技术在海上 J 油田的应用[J]. 天津科技, 2019, 46(12): 54-56.
ZHOU Haijun, CHENG Shaohua, GAO Yonghua, et al. Application of hollow rod electric heating technology in offshore J oilfield [J]. Tianjin Science & Technology, 2019, 46(12): 54-56.
- [17] ZENDEHBOUDI S, AHMADI M A, MOHAMADZADEH O, et al. Thermodynamic investigation of asphaltene precipitation during primary oil production: laboratory and smart technique [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(17): 6009-6031.
- [18] 康志江,黄咏梅,易斌,等. 塔河奥陶系油藏沥青质沉淀形成机理研究[J]. 特种油气藏, 2008, 15(6): 34-37.
KANG Zhijiang, HUANG Yongmei, YI Bin, et al. A studying on the formation mechanism of heavy hydrocarbon stemming in Ordovician Reservoir of Tahe oilfield [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(6): 34-37.
- [19] 高达,张乔良,米洪刚. 沥青质沉积对油井产能影响的模拟分析——以南海北部湾盆地 W-1 油田为例[J]. 中国海上油气, 2016, 28(6): 53-58.
GAO Da, ZHANG Qiaoliang, MI Honggang. Simulation analysis of the influence of asphaltene deposition on oil well productivity; a case study of W-1 oilfield in Beibuwan Basin of South China Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(6): 53-58.
- [20] 赵凤兰,鄢捷年. 原油沥青质的沉积条件及其控制[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(4): 62-65.
ZHAO Fenglan, YAN Jienian. Precipitation condition of crude asphaltene and its controlling [J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2005, 29(4): 62-65.
- [21] 石端胜,袁伟杰,王宏申,等. 渤海 B 油田胶质沥青沉积规律研究[J]. 复杂油气藏, 2020, 13(1): 66-69.
SHI Duansheng, YUAN Weijie, WANG Hongshen, et al. Study on law of colloid asphalt deposition in Bohai B Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2020, 13(1): 66-69.