

高温高压油藏井壁沉淀物成因研究

——以准噶尔盆地高探 1 井为例

李二庭^{1,2}, 蒋宜勤^{1,2}, 林莉莉^{1,2}, 迪丽达尔·肉孜^{1,2},
谢礼科^{1,2}, 周 妮^{1,2}, 安 科^{1,2}

(1.新疆砾岩油藏实验室,新疆 克拉玛依 834000;2.中国石油 新疆油田分公司 实验检测研究院,新疆 克拉玛依 834000)

摘要:油气藏开采过程中出现的井壁沉淀物会产生一系列地质和工程问题。以中国陆上油气勘探最近取得重大突破的准噶尔盆地南缘高探 1 井为例,针对高温高压条件下原油开采过程中井壁出现的大量黑色固体不溶沉淀物,通过对该沉淀物进行系统的岩石学和地球化学分析,包括族组分、气相色谱、液相色谱、含蜡量及热解实验等,明确了沉淀物的组成,进而探讨了其成因与意义。结果表明,高探 1 井壁沉淀物由可溶有机质和泥粉砂质组成,其中可溶有机质主要由沥青质组成,泥粉砂质以细粉砂为主。高探 1 井原油开采过程中,从地层到井筒,温度和压力迅速下降,其轻质组分优先分逸流出,原油动态稳定体系被破坏,造成溶解于原油中的沥青质析出、絮凝,并吸附在井壁上,在此过程中,井底的泥沙随流体流动混入沥青析出物中,一起长大堆积。这可能是高温高压条件下油气开采过程的普遍现象,需筛选强极性沥青分散剂来增加原油体系稳定性,对已结垢的井筒采用强极性试剂进行化学清洗,增加井底滤网,减少砂泥固体颗粒。

关键词:井壁沉淀物;轻质油;油藏地球化学;高温高压;高探 1 井;准噶尔盆地

中图分类号:TE358

文献标识码:A

Origin and significance of wellbore sediment in reservoir development:

a case study of well Gaotan 1 in Junggar Basin

LI Erting^{1,2}, JIANG Yiqin^{1,2}, LIN Lili^{1,2}, DILIDAER Rouzi^{1,2}, XIE Like^{1,2}, ZHOU Ni^{1,2}, AN Ke^{1,2}

(1. Xinjiang Laboratory of Petroleum Reserve in Conglomerate, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. Research Institute of Experiment and Testing, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: During the development of oil and gas reservoirs, wellbore sediment will bring a series of problems, so it is important to identify the cause of wellbore sediment. The discovery in well Gaotan 1 is an important milestone in the history of oil and gas exploration in the Junggar Basin. However, with the exploitation of crude oil in this well, a large amount of black solid insoluble sediment blocked the wellbore. The composition of the sediment was clarified by various experimental analysis methods, such as group component analysis, gas chromatography, liquid chromatography, wax content analysis and pyrolysis experiments. The results allowed the study of the formation mechanism of the solid-phase sediment in well Gaotan 1 and the development of site control measures. The sediment in well Gaotan 1 is composed of soluble organic matter (mainly asphaltene) and silty sand (mainly fine silt). In the process of crude oil exploitation, the temperature and pressure of crude oil decrease from stratum to wellbore, and the light components in crude oil are preferentially separated and flow out, destroying the dynamic stability of the crude oil, and asphaltene dissolved in the crude oil to precipitate and flocculate, and finally to be adsorbed on the pipe wall. At the same time, silty sand at the bottom of the well is mixed with the asphalt precipitate with fluid flow, and grows with asphalt precipitate. This may be a common phenomenon in the oil and gas production process under high temperature and high pressure conditions. It is necessary to choose strong polar asphalt dispersants to increase the stability of the crude oil system, and use strong polar reagents for chemical cleaning of the scaled wellbore. More bottom hole filters are required to reduce sand and mud solid particles.

Key words: wellbore sediment; light oil; reservoir geochemistry; high temperature and high pressure; well Gaotan 1; Junggar Basin

收稿日期:2019-12-27;修订日期:2020-09-01。

作者简介:李二庭(1988—),男,博士,高级工程师,主要从事油气地球化学研究工作。E-mail:lierting@petrochina.com.cn。

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2017D04023)资助。

油井开采过程中井筒内常常遇见沉淀堵塞物,影响了油井的正常生产,严重时甚至造成停产,因此查明井筒沉淀堵塞物成因对于现场制定解堵措施具有重要指导意义,有利于油井正常平稳生产^[1-6]。目前研究认为,井筒沉淀物的形成具有复杂的成因机理,不同情况下的表现不同。文献中报道的成因包括高碳数蜡的沉积^[7-9],高含沥青质原油中的沥青质易絮凝和沉积^[10-13],单质硫与有机物混合物混合形成^[14-15],地层砂与无机盐类矿物形成堵塞物^[16-18]等等。

准噶尔盆地高探 1 井位于盆地南缘四棵树凹陷高泉背斜。2019 年 1 月,该井白垩系清水河组试油获得高产工业油气流,最高日产超过千方,实现了准噶尔盆地南缘下组合油气勘探的首次重大突破,具有重要典范意义^[19-21]。前人的研究认为高探 1 井油气同源,主要来自高成熟的侏罗系烃源岩^[22]。高探 1 井原油为轻质油,具有密度低、黏度低、含蜡量中等、凝固点中等的特点,属于弱挥发性油藏^[23]。但随着高探 1 井的开采,其井壁出现了大量黑色固体不溶沉淀物,堵塞了井筒,严重影响了该井的正常生产,与原油轻质,理论上应不大可能出现沉淀物的推论不符。因此亟需明确固体沉淀物的成因机理,为现场工程工艺改进和预防措施制定提供依据。

本文通过运用热解、族组分等分析手段,明确了高探 1 井井壁沉淀物的地球化学组成,并对比高探 1 井原油组成,探讨了其形成原因。

1 原油性质基本特征

准噶尔盆地南缘高探 1 井连续原油取样,其物

性及组分数据见表 1。从表中可以看出,高探 1 井原油为轻质油,随时间开采,原油性质整体上没有明显变化,呈现密度低、黏度低、中等含蜡、析蜡点低、基本不含水的特点,20 ℃密度分布在 0.807 8~0.828 6 g/cm³,50 ℃时黏度分布在 2.0~2.6 mPa·s,含蜡量分布在 6.26%~8.01%,析蜡点分布在 16.75~19.20 ℃,族组分中以饱和烃为主,含量分布在 65.01%~78.77%,沥青质含量低,分布在 1.24%~8.30%。

2 高探 1 井井壁沉淀物组成

2.1 井壁沉淀物岩石学分析

本文分析的高探 1 井井壁沉淀物分别为井口处、井壁 1 400 m 处、井壁 2 800 m 处样品,在肉眼形态均呈黑色固体块状,外观特征近似沥青(图 1a),对沉淀物固体含量分析主要采用悬浮法和热解法完成。悬浮法为用 100 mL 苯溶解 5 g 左右井壁沉淀物样品,真空抽滤,滤纸采用孔径为 5 μm 的水系滤膜,通过滤膜前后增重与原始井壁沉淀物重量比值,计算含固量;热解法,热解温度 600 ℃,通过井壁沉淀物热解后(图 1b)与热解前样品重量比值(图 1a)计算固体含量。结果显示,以 1 400 m 处样品为例,悬浮法计算固体含量为 37.08%;热解法计算固体含量为 30.88%。可见,沉淀物中无机矿物杂质含量较高,这对于沥青质的沉淀可能存在一定的促进作用。

针对沉淀物中泥砂固体开展岩石薄片鉴定和粒度分析,结果见图 2。从显微镜下显示可以看出,1 400 m 处井壁沉淀物主要是原油和泥粉砂质的混合物(图 2a),以细粉砂为主。激光粒度分析

表 1 准噶尔盆地南缘高探 1 井地面原油物性及族组分特征
Table 1 Physical properties and family composition characteristics of oil from well Gaotan 1 on the southern margin of Junggar Basin

取样日期	饱和烃/%	芳烃/%	胶质/%	沥青质/%	含水/%	密度/(g·cm ⁻³)	含蜡/%	析蜡点/℃	黏度/mPa·s		
									20 ℃	30 ℃	50 ℃
1 月 4 日	70.28	14.15	8.02	7.55	0.373	0.814 4	7.42	19.20	4.2	3.4	2.4
1 月 14 日	65.01	20.00	10.83	4.17	0.161	0.807 8	6.77	18.30	5.6	3.4	2.3
1 月 22 日	80.00	13.75	5.00	1.24	0.012	0.819 9	7.12		3.6	3.0	2.2
1 月 30 日	68.88	16.60	6.22	8.30	0.083	0.813 4	6.54		3.6	2.8	2.1
2 月 7 日	75.28	16.35	5.32	3.04	0.012	0.818 4	7.29		3.5	2.8	2.0
3 月 7 日	76.68	16.60	4.74	1.97	0.104	0.817 0	7.34		4.0	3.2	2.2
3 月 10 日	78.77	15.47	3.95	1.80	0.125	0.822 8	6.26		4.7	3.6	2.2
7 月 1 日	73.61	18.06	6.48	1.85	0.012	0.828 5	8.01	18.60	4.6	3.6	2.5
7 月 2 日	71.91	20.00	6.38	1.71	0.012	0.827 7	7.50	18.05	4.7	3.7	2.6
7 月 3 日	68.91	19.17	7.25	4.67	0.012	0.828 4	7.84	17.80	4.7	3.8	2.6
7 月 4 日	73.61	17.47	5.95	2.97	0.012	0.828 6	7.46	16.75	4.6	3.7	2.6

注:取样年份为 2019 年(表 4 同),密度为 20 ℃时测定值。

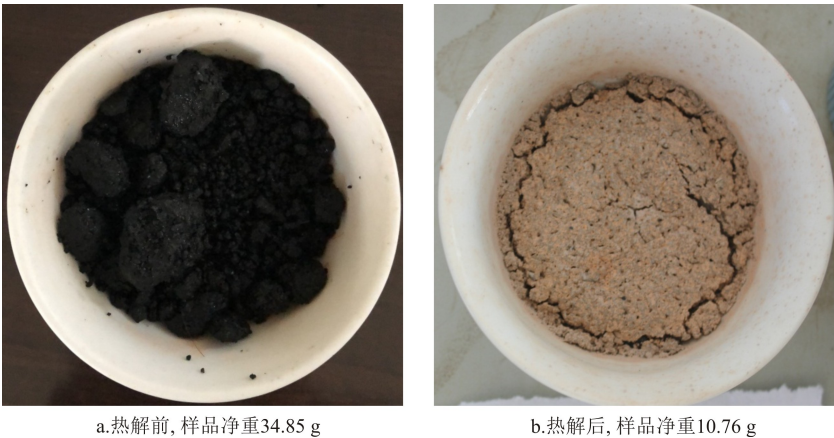


图 1 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物热解实验

Fig.1 Pyrolysis experiment of wellbore sediment in well Gaotan 1, Junggar Basin

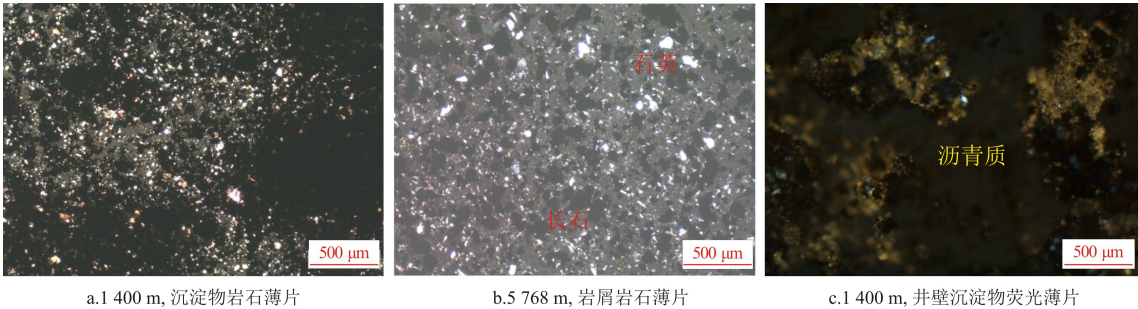


图 2 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物与岩屑显微镜下特征对比

Fig.2 Microscopic characteristics comparison of wellbore sediments and debris in well Gaotan 1, Junggar Basin

结果显示砂质粒径主峰分布在 20~30 μm 范围内,成分主要为石英、长石、泥质、方解石、铁质、碳质,与高探 1 井 5 768~5 770 m 岩屑成分相似(图 2b)。荧光呈浅褐黄色,主要为胶质沥青和油质沥青的混合物(图 2c)。

2.2 井壁沉淀物有机组物性分析

对高探 1 井井壁沉淀物进行可溶性及熔融性分析,结果见表 2、表 3 和图 3。井壁沉淀物可溶性实验步骤如下:取适量的 1 400 m 井壁沉淀物样品,分别放入 10 mL 不同极性的有机溶剂进行可溶性实验,溶解率数据见表 2。可以看出,随着有机溶剂极性增大,溶剂对样品的溶解性增强,样品溶解率升高。在极性较低的溶剂油、石油醚、正己烷中,沉淀物的溶解率在 50% 左右,过滤后,有成块

表 3 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物中有机质在不同温度下溶解实验
Table 3 Melting experiments of organic matter in wellbore sediments in well Gaotan 1, Junggar Basin

温度/ $^{\circ}\text{C}$	状态描述
25	固体,块状,质地黏软
40	轻微沾壁
45	稍熔,沾壁
50	部分样品开始软化
55	全部软化,呈软坨状
60	有少量流动油液
70	流动油液增多
80	全部溶解,呈拉丝状
90	全部溶解,可流动,有光泽感
降至室温后	重新凝固,黑色光亮细腻状

表 2 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物中有机质在不同极性有机溶剂中的溶解情况

Table 2 Dissolving ability of different polar organic solvents for organic matter in wellbore sediments in well Gaotan 1, Junggar Basin

溶剂	溶剂油	石油醚	正己烷	二甲苯	二氯甲烷	三氯甲烷
溶剂极性		0.01	0.06	2.5	3.4	4.4
溶解率/%	48.36	50	54.94	100	100	100

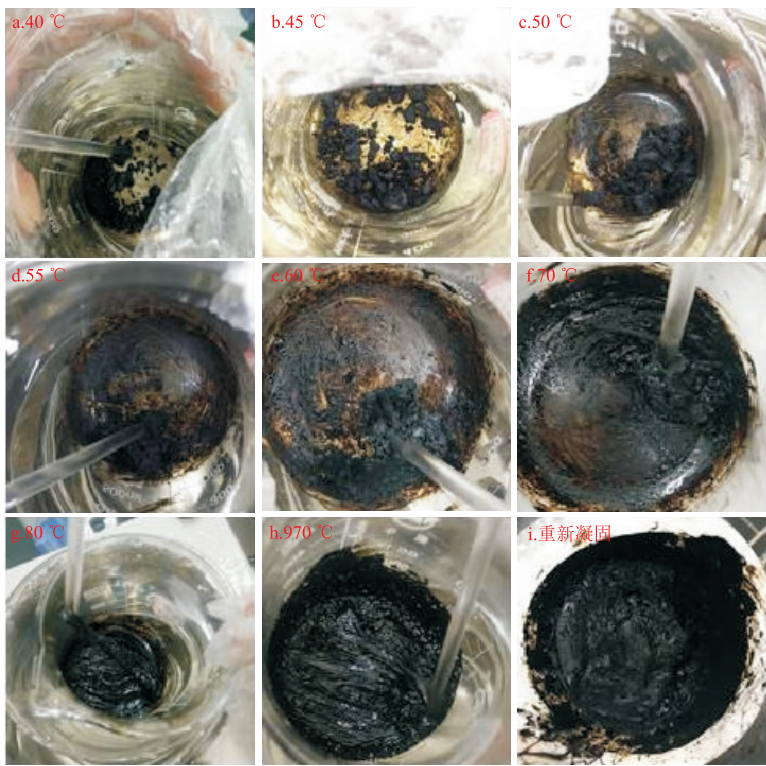


图 3 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物熔解实验

Fig.3 Melting experiment of wellbore sediments in well Gaotan 1, Junggar Basin

状的不溶固体。相比而言,在极性较高的二甲苯、二氯甲烷、三氯甲烷中,沉淀物基本溶解,过滤后仅有极少的小颗粒杂质。通过分析,发现残余小颗粒杂质为泥沙物质,说明高探 1 井井壁沉淀物主要为可溶有机质。

井壁沉淀物溶解性实验:为明确高探 1 井井壁沉淀物样品随温度变化情况,进行了熔融性实验。同样取适量的 1 400 m 井壁沉淀物样品置于烧杯中,水浴升温,升温范围 40~90 ℃,每隔 5~10 ℃作为一个温度点,保持 20 min,观察样品的流动状态,在 90 ℃温度点观察后将样品自然降温至室温,实验结果见图 3 和表 3。可以看出,随着温度的升高,沉淀物样品逐渐由固体块状软化,在加热至 55 ℃,样品全部软化,成软坨状,在 60 ℃时样品开始出现流动状态,在 90 ℃时,沉淀物已全部熔解,具有可流

动,有光泽感,加热后样品温度在降至室温后,重新凝固,呈细腻状,有光泽感,表现出沥青的特点。

2.3 井壁沉淀物中含蜡量分析

井壁沉淀物蜡含量分析结果显示,含蜡量较低,以 1 400 m 处样品为例,其含蜡量为 2.84%,析蜡点 21.2 ℃。从前文井壁沉淀物的熔解实验也可以看出,在室温 25 ℃时,沉淀物呈黑色粗糙状的固体状态,且样品在加热至 60 ℃时才开始出现流动状态,说明高探 1 井井壁沉淀物形成原因与原油蜡析出的关系不大。

2.4 井壁沉淀物族组分分析

采用二氯甲烷溶解井壁沉淀物,过滤除去固体杂质,可溶有机质挥发晾干,进行族组分分析,结果见表 4。从表中可以看出,高探 1 井井壁沉淀物中可溶有机质与原油组成差异明显,主要以沥青质为

表 4 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物中有机质族组分特征
Table 4 Composition of organic matter in wellbore sediments in well Gaotan 1, Junggar Basin

							%
取样日期	取样点	序号	饱和烃	芳烃	胶质	沥青质	
1 月 17 日	井口处	第一组	38.08	12.21	5.52	44.20	
		第二组	39.41	11.73	6.19	42.67	
3 月 30 日	1 400 m	第一组	12.88	9.09	4.17	73.86	
		第二组	11.76	8.46	3.67	76.10	
4 月 1 日	2 800 m	第一组	20.48	5.11	2.36	72.05	
		第二组	20.08	4.18	2.93	72.81	

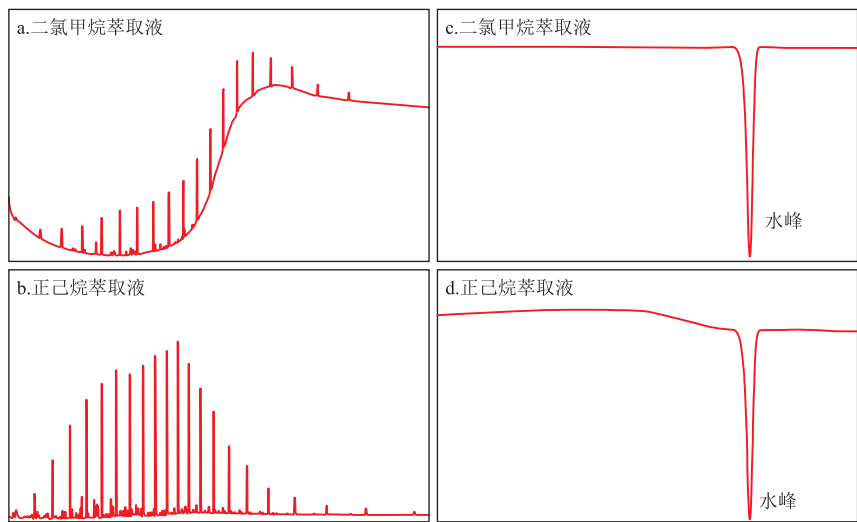


图 4 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物不同溶剂溶解液气相色谱(a,b)和水相液相色谱(c,d)

Fig.4 Gas chromatograms(a,b) and aqueous liquid chromatograms(c,d) of different solvent dissolved wellbore sediments in well Gaotan 1, Junggar Basin

主,井口处沉淀物的沥青质含量较低,含量在 40% 以上,井壁沉淀物的沥青质含量达到 70% 以上。

2.5 井壁沉淀物可溶有机质色谱分析

为明确高探 1 井井壁沉淀物中是否含有聚合物及可溶有机质的主要成分,采用色谱和液相色谱技术进行了分析,结果见图 4。从图 4 可以看出,二氯甲烷萃取液色谱图中出现较大的“基线鼓包”,说明存在胶质、沥青质一类的高质量数、沸点较高,气相色谱质谱联用仪无法分离的物质。正己烷萃取液色谱图可看出,主峰碳数为 C₂₄,说明该沉淀物烷烃主要成分为中质组分,属中质油,原油中的轻质组分优先分逸流出。沉淀物水层萃取液液相色谱图中只有一个水的倒峰,说明没有易溶于水相的大分子量的物质,沉淀物样品中不含大分子聚合物。

3 高探 1 井井壁沉淀物成因分析

前人的研究认为原油中沥青质、胶质、芳香烃、烷烃组分在一定比例条件下处于平衡状态,沥青质不易析出,在原油开采过程中,当温度和压力发生改变,会造成原油组成发生变化,原油动态稳定体系被破坏,会造成原油中沥青质析出、缔合为絮状物而沉积在井筒表面^[23-29]。通过原油的胶体系统不稳定指数可以宏观预测原油是否会发生沥青质析出,该指数定义为 $CII = [(\text{饱和分质量分数} + \text{沥青质质量分数}) / (\text{芳香分质量分数} + \text{胶质质量分数})]^{[30]}$ 。 $CII \leq 0.7$,原油体系稳定; $0.7 < CII < 0.9$,原油体系比较稳定; $CII \geq 0.9$,原油体系不稳定,易发生沥青质析出。高探 1 井原油的胶体系统不稳定指数分布在 2.2~4.1 范围,表明原油处于不稳定

体系,容易析出沥青质。

前人的研究表明,高探 1 井油源可能来自四棵 树凹陷侏罗系烃源灶^[18],生成的原油成熟度高,轻质组分含量高,C₁—C₅组分含量为 71.41%^[19]。井壁沉淀物沥青质组成主要为高缩合度组分,从元素组成分析上看,沥青质的 H/C 比达到 1.04,氧元素含量达到 7.95%,氮、硫元素含量较低,含量低于 1%,表明沥青质主要为高缩合度芳烃,具有较多含氧杂原子。由于高探 1 井油藏地层条件下为单相液态流体,地层异常高压,地层能量充足,轻质组分对高缩合度沥青质组分溶解能力强,易于将沥青质从地层中携带入井筒。

综合以上的分析,认为高探 1 井井壁沉淀物形成与其油藏特殊性有关。高探 1 井井壁沉淀物主要以可溶有机质为主,含量在 70% 左右,含泥粉砂质颗粒,其中可溶有机质又主要由高缩合度沥青质组成,高缩合度主要是由于高的热演化程度造成的,其含量占有机质的 70% 以上。故可以推断,高探 1 井井壁沉淀物的形成原因可能是在高温高压井油藏地层中,轻质组分以超临界流体形态存在,对难溶的高缩合度沥青质具有很强的溶解性,原油呈单相流体状态,而在原油开采过程中,温度和压力下降快,从而导致轻质组分优先分逸流出,原油分异为两相,溶解于轻质油中的高缩合度沥青质的溶解度明显下降,造成沥青质析出、絮凝,并吸附在井壁上^[31],在此过程中,井底的泥沙随流体流动混入沉淀物中,随沉淀物一起长大堆积。

这一结果对于认识准噶尔盆地南缘高探 1 井这类高温高压油藏原油开采具有重要启示意义。

高热演化易形成高缩合度沥青质,该类沥青质在温度和压力下降后一定会从原油中沉淀出来,且该组分是原油体系中极性最强的一种物质,极易吸附在固体表面。针对高探 1 井井壁结垢的问题,建议筛选强极性沥青分散剂来增加原油体系稳定性,抑制原油中沥青质的析出,对已结垢的井筒采用强极性试剂进行化学清洗,增加井底滤网,减少砂泥固体颗粒。

4 结论

(1) 准噶尔盆地高探 1 井井壁沉淀物是可溶有机质与泥粉砂质的混合物,可溶有机质主要由沥青质组成,含量达到 70% 以上,无机矿物以细粉砂为主。

(2) 高探 1 井井壁沉淀物形成原因是在原油开采过程中,随着压力和温度的降低,导致原油中轻质组分优先分逸流出,原油动态稳定体系被破坏,导致沥青质析出并沉积在井壁表面,并逐渐堆积长大。

(3) 井壁沉淀物的形成可能是高温高压井原油开采的普遍现象,其组成和成因研究为现场治理措施的制定提供了依据,有利于原油平稳高效开采。

参考文献:

- [1] 吴燕,唐斌,晏楠,等.迪那 2 气田井筒堵塞物来源分析及解堵方法[J].江汉大学学报(自然科学版),2019,47(2):146-151.
WU Yan,TANG Bin,YAN Nan,et al.Gas well blockage source analysis and unplugging treatment of Dina-2 gas field[J].Journal of Jianghan University (Natural Science Edition),2019,47(2):146-151.
- [2] 范华波,薛小佳,安杰,等.致密油水平井中低温可降解暂堵剂研发与性能评价[J].断块油气田,2019,26(1):127-130.
FAN Huabo,XUE Xiaojia,AN Jie,et al.Development and performance evaluation of medium-low temperature degradable temporary plugging agent in tight oil horizontal wells[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2019,26(1):127-130.
- [3] 石静,曹绪龙,王红艳,等.胜利油田高温高盐稠油油藏复合驱技术[J].特种油气藏,2018,25(4):129-133.
SHI Jing,CAO Xulong,WANG Hongyan,et al.Combination flooding technology used in high-temperature, high-salinity heavy oil reservoirs of Shengli Oilfield[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2018,25(4):129-133.
- [4] 马靖翔,杨松林,姬华勇,等.适用于稠油油藏的新型化学复合解堵技术[J].断块油气田,2019,26(5):800-804.
MA Jingxiang,YANG Songlin,JI Huayong,et al.New chemical compound plugging removal technology for heavy oil reservoirs[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2019,26(5):800-804.

- [5] 李小刚,谢信捷,杨兆中,等.特低渗凝析气藏复合解堵技术应用[J].油气藏评价与开发,2017,7(3):44-49.
LI Xiaogang,XIE Xinjie,YANG Zhaozhong,et al.Composite plug removal technology for ultra-low permeability condensate gas reservoir[J].Reservoir Evaluation and Development,2017,7(3):44-49.
- [6] 肖国华,付小坡,王金生,等.水平井预置速凝堵剂管外封窜技术[J].特种油气藏,2018,25(6):136-139.
Xiao Guohua,Fu Xiaopo,Wang Jinsheng,et al.External plugging with preset quick-setting plugging agent in horizontal well[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2018,25(6):136-139.
- [7] 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.
- [8] 杨文明,康凡,罗慎超,等.哈拉哈塘油田高含蜡原油降凝剂合成及性能研究[J].应用化工,2017,46(4):641-645.
YANG Wenming,KANG Fan,LUO Shenchao,et al.High waxy crude oil pour point depressant synthesis and performance research on Halahatang oilfield[J].Applied Chemical Industry,2017,46(4):641-645.
- [9] 安永生,周大可,欧阳铁兵,等.基于热力学模型的油井井筒析蜡规律[J].断块油气田,2019,26(5):649-652.
AN Yongsheng,ZHOU Dake,OUYANG Tiebing,et al.Research on patterns of wax precipitation in wellbore based on thermodynamic model[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2019,26(5):649-652.
- [10] 杨祖国,安娜,欧阳冬,等.塔河原油井筒沥青堵塞与防治技术研究[J].应用化工,2014,43(S2):3-8.
YANG Zuguo,AN Na,OUYANG Dong,et al.Dispersion and removal technology research of Tahe asphaltic well[J].Applied Chemical Industry,2014,43(S2):3-8.
- [11] 郭元.伊拉克格拉芙油田井筒堵塞机理研究[J].新疆石油天然气,2017,13(3):62-64.
GUO Yuan.Mechanism study of wellbore asphaltenes plugging in Garraf oilfield[J].Xinjiang Oil & Gas,2017,13(3):62-64.
- [12] 张润合,斯春松,黄羚,等.黔北坳陷小草坝古油藏储层沥青成因及演化[J].石油实验地质,2017,39(1):99-105.
ZHANG Runhe,SI Chunsong,HUANG Ling,et al.Genesis and evolution of reservoir bitumen in Xiaocaoba paleo-oil reservoir, Qianbei Depression[J].Petroleum Geology & Experiment,2017,39(1):99-105.
- [13] 王强,宁传祥,马中良,等.不同性质原油保存能力评价实验及应用[J].石油实验地质,2019,41(5):739-745.
WANG Qiang,NING Chuanxiang,MA Zhongliang,et al.Preservation of crude oil with different properties and implication for deep oil exploration[J].Petroleum Geology & Experiment,2019,41(5):739-745.
- [14] 廖碧朝,宋永芳,梁顺武,等.含硫化氢气井井筒堵塞解堵对

- 策研究[J]. 油气井测试, 2015, 24(6): 62-64.
- LIAO Bichao, SONG Yongfang, LIANG Shunwu, et al. Plug removal countermeasures to well bore plugging of gas well bearing hydrogen sulfide[J]. Well Testing, 2015, 24(6): 62-64.
- [15] 彭松, 姜贻伟, 宿亚仙, 等. 普光气田高含 H_2S 天然气中硫含量及临界析出压力测定[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 573-576.
- PENG Song, JIANG Yiwei, SU Yaxian, et al. Content determination and critical precipitation pressure of elemental sulfur in sour gas rich in H_2S in Puguang Gas Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 573-576.
- [16] 聂延波, 王洪峰, 王胜军, 等. 克深气田异常高压气井井筒异常堵塞治理[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(1): 84-90.
- NIE Yanbo, WANG Hongfeng, WANG Shengjun, et al. Management of abnormal wellbore plugging in abnormal-high pressure gas wells, Keshen [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(1): 84-90.
- [17] 葛嵩, 卢祥国, 刘进祥, 等. 无机地质聚合物凝胶封堵效果和储层适应性研究[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(3): 51-54.
- GE Song, LU Xiangguo, LIU Jinxiang, et al. Study on plugging effect and reservoir adaptability of inorganic geopolymer gel[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(3): 51-54.
- [18] 蒋永平. CO_2 复合驱油分子动力学模拟及微观机理研究[J]. 石油实验地质, 2019, 41(2): 274-279.
- JIANG Yongping. Molecular dynamics simulation and microscopic mechanism of CO_2 composite flooding[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(2): 274-279.
- [19] 况军. 准噶尔盆地西南部构造特征及油气聚集分析[J]. 石油勘探与开发, 1991, 18(6): 11-18.
- KUANG Jun. The structural characteristics and analysis of oil and gas accumulation in the southwestern part of Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 18(6): 11-18.
- [20] 杜金虎, 支东明, 李建忠, 等. 准噶尔盆地南缘高探1井重大发现及下组合勘探前景展望[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 205-215.
- DU Jinhu, ZHI Dongming, LI Jianzhong, et al. Major breakthrough of well Gaotan 1 and exploration prospects of lower assemblage in southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 205-215.
- [21] 何海清, 支东明, 雷德文, 等. 准噶尔盆地南缘高泉背斜战略突破与下组合勘探领域评价[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 137-146.
- HE Haiqing, ZHI Dongming, LEI Dewen, et al. Strategic breakthrough in Gaoquan anticline and exploration assessment on lower assemblage in the southern margin of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 137-146.
- [22] 靳军, 王飞宇, 任江玲, 等. 四棵树凹陷高探1井高产油气成因与烃源岩特征[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 145-151.
- JIN Jun, WANG Feiyu, REN Jiangling, et al. Genesis of high-yield oil and gas in well Gaotan-1 and characteristics of source rocks in Sikeshe Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 145-151.
- [23] 梁宝兴, 周伟, 刘勇, 等. 四棵树凹陷高探1井流体特征及油藏类型分析[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 152-155.
- LIANG Baoxing, ZHOU Wei, LIU Yong, et al. Fluid features and reservoir types in well Gaotan-1 in Sikeshe Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 152-155.
- [24] 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.
- [25] 曹松, 杜政学, 吴仲岩, 等. 伊拉克 H 油田原油沥青质沉积趋势预测及分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 36-40.
- CAO Song, DU Zhengxue, WU Zhongkui, et al. Prediction and analysis of asphaltene deposition trend in Iraq H oilfield [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 36-40.
- [26] 王琛, 李天太, 高辉, 等. CO_2 驱沥青质沉积量对致密砂岩油藏采收率的影响机理[J]. 油气地质与采收率, 2018, 25(3): 107-111.
- WANG Chen, LI Tiantai, GAO Hui, et al. Potential evaluation of different thermal-recovery technologies for heavy oil [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(3): 107-111.
- [27] 干华文, 孙红海, 刘勇, 等. 桑塔木油田沥青析出影响因素及举措[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2017, 19(1): 27-31.
- GAN Huawen, SUN Honghai, LIU Yong, et al. Factors influencing asphalt precipitation in Sangtamu oilfield and countermeasures [J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2017, 19(1): 27-31.
- [28] 何汉平, 黄健林, 赵凤兰, 等. 伊朗雅达油田完井测试作业中沥青质析出分析[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 52-55.
- HE Hanping, HUANG Jianlin, ZHAO Fenglan, et al. Asphaltene precipitation analysis in well testing in Yada oilfield, Iran [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(21): 52-55.
- [29] 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): 56-59.
- ZHAO Fenglan, YAN Jienian. Precipitation condition of crude asphaltene and its controlling [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2005, 29(4): 56-59.
- [30] SEDGHI M, GOUAL L, WELCH W, et al. Effect of asphaltene structure on association and aggregation using molecular dynamics [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117(18): 5765-5776.
- [31] 闪从新, 李晓平, 秦海非, 等. 多裂缝水平井非稳态产能模型及计算方法研究[J]. 油气井测试, 2008, 17(6): 5-7.
- SHAN Congxin, LI Xiaoping, QIN Haifei, et al. Study on the unsteady productivity model of horizontal well with multiple transversal fracture and calculation method [J]. Well Testing, 2008, 17(6): 5-7.