

# 渤海 B 油田胶质沥青沉积规律研究

石端胜<sup>1</sup>, 袁伟杰<sup>1</sup>, 王宏申<sup>1</sup>, 刘跃忠<sup>2</sup>, 王锦林<sup>1</sup>, 张志军<sup>1</sup>, 丛越男<sup>1</sup>

(1.中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452; 2.中海石油(中国)有限公司秦皇岛 32-6 作业公司, 天津 300450)

**摘要:**胶质沥青质沉积对储层渗透率造成伤害, 严重制约油田产能释放, 及时判断是否存在沉积及其对产能的影响程度对油田生产开发具有重要意义。采用气-液-固三相平衡热力学模型, 结合原油组分组成实验数据, 判别渤海 B 油田容易发生胶质沥青质沉积。利用实际油田参数建立单井径向流模型, 分析了胶质沥青质沉积与地层压力的关系, 模拟了胶质沥青质沉积对产量的影响及储层伤害程度。研究发现: 随着油田开发时间增加, 地层压力逐渐下降, 当压力下降到 36~40 MPa 时, 胶质沥青质开始析出, 当压力下降至 28~33 MPa 时, 胶质沥青沉积速度加快, 对储层渗透率伤害增大, 产量大幅下降, 胶质沥青沉积可使产量降低 80% 以上。

**关键词:**热力学模型; 胶质沥青沉积; 径向流模型; 沉积速度

**中图分类号:**TE357      **文献标志码:**A

## Study on law of colloidal asphalt deposition in Bohai B Oilfield

SHI Duansheng<sup>1</sup>, YUAN Weijie<sup>1</sup>, WANG Hongshen<sup>1</sup>, LIU Yuezhong<sup>2</sup>, WANG Jinlin<sup>1</sup>,  
ZHANG Zhijun<sup>1</sup>, CONG Yuenan<sup>1</sup>

(1.CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China; 2.QHD 32-6 Oilfield of CNOOC(China)Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** The colloidal asphalt deposition harms the reservoir permeability and seriously restricts the release of oilfield productivity. It is of great significance for oilfield production and development to timely judge whether there are the deposition and the degree of its impact on productivity. Based on the gas-liquid-solid equilibrium thermodynamic model and the experimental data of crude oil composition, it is concluded that colloidal asphaltene deposition is easy to occur in Bohai B Oilfield. A single radial flow model was established based on actual oilfield parameters; it was analyzed the relationship between colloid asphaltene deposition and formation pressure, and it was simulated the effects of colloidal asphaltene deposition on production and reservoir damage. It was found that the formation pressure gradually decreased with the increase of oilfield development time. When the pressure dropped to 36 to 40 MPa, the colloidal asphaltene began to precipitate. When the pressure decreased to 28 to 33 MPa, the deposition rate of colloidal asphalt accelerated, the damage to reservoir permeability increased, and the production decreased significantly, the colloid asphalt deposition reduced well production by more than 80%.

**Key words:** the equilibrium thermodynamic model; colloid asphalt deposition; radial flow model; deposition rate

渤海B油田主要开发沙河街组, 胶质沥青质含量较高, 为5.33%~32.4%, 原始地层压力47 MPa, 平均地层压力30 MPa, 油藏温度120 ℃。随着油田不断的生产开发, 地层压力逐渐下降, 在近井地带及井筒附近胶质沥青质容易析出, 对油井产能造成严重影响<sup>[1-4]</sup>。本文利用气-液-固三相平衡热力学方程判别油田胶质沥青沉积析出, 由此建立单井径向流模型, 进行数值模拟研究, 对胶质沥青沉积规律进行模拟分析和预测, 旨在为油田开展相关解堵工艺措施提供重要依据。

## 1 胶质沥青质沉积模拟计算判别

### 1.1 模拟计算目的

通过建立井下油管内胶质沥青沉积过程气-液-固三相平衡热力学模型, 可以描述温度、压力和组成等热力学条件对气-液-固三相相态的影响, 以及

收稿日期: 2019-07-11; 改回日期: 2019-08-25。

第一作者简介: 石端胜(1987—), 硕士, 工程师, 现从事提高采收率方面工作。E-mail: shidsh@cnooc.com.cn。

在气-液-固三相相态转换过程中和在气-液-固三相平衡时各组分的变化规律,以确定胶质沥青沉积物的形成原因及关键因素临界点<sup>[5-7]</sup>。

1.2 模拟计算方法

(1)在求解气-液-固三相平衡问题时,采用PR状态方程计算气-液平衡。

(2)对液-固平衡,将固相视为非理想的固态溶液,应用正规溶液理论来处理。

(3)用有限的高压模拟实验数据回归热力学模型中的参数。

(4)原油组分特征化方法采用前面原油族组成分析结果。

1.3 热力学计算模型

根据热力学相平衡原理,气、液、固三相的逸度分别表示为:

气相逸度: $f_i^v=x_i^v\phi_i^vp$  (1)

液相逸度: $f_i^L=x_i^L\phi_i^Lp$  (2)

固相逸度: $f_i^s=a_i^sf_i^{os}=x_i^sr_i^sf_i^{os}$  (3)

气相和液相逸度计算(PR状态方程):  
$$p=\frac{RT}{V-b_m}-\frac{a_m}{V(V+b_m)+b(V-b_m)}$$
 (4)

式中 $a_m=a(T)a_c$   
$$a(T)=[1+m(1-T_r^{0.5})]^2$$
  
$$m=0.374\ 64+1.542\ 26\omega-0.269\ 92\omega^2$$
  
$$T_r=T/T_c$$
  
$$a_c=0.457\ 235R^2T_c^2/p_c$$
  
$$b_m=0.077\ 796RT_c/p_c$$

液相逸度计算(PR状态方程):将上式按压缩因子Z的形式表示,则有

$$Z^3-(1-B)Z^2+(A-3B^2-2B)Z-(AB-B^2-B^3)=0$$
 (5)

式中  $A=\frac{a_m p}{(RT)^2}$ ,  $B=\frac{b_m p}{RT}$ ,  $Z=\frac{pV}{RT}$

状态方程参数 $a_m$ 和 $b_m$ 可由纯组分的相应参数 $a_i$ 和 $b_i$ 按混合规则求得:

$$b_m=\sum_i x_i b_i \quad a_m=\sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij} \quad a_{ij}=\sqrt{a_i a_j} (1-k_{ij})$$
 (6)

混合物中*i*组分的逸度系数的表达式为:

$$\ln \phi_i=\frac{b_i}{b_m}(Z-1)-\ln(Z-B)-\frac{A}{2\sqrt{2}B}\left[\frac{2\sum_j x_j a_{ij}}{a_m}-\frac{b_i}{b_m}\right]\times$$
  
$$\ln\left[\frac{Z+(1+\sqrt{2})B}{Z+(1-\sqrt{2})B}\right]$$
 (7)

胶质沥青液相逸度:  
$$f_a^*=x_a\phi_ap$$
 (8)

固相胶质沥青逸度计算:  
$$\ln f_a=\ln f_a^*+\frac{V_a(p-p^*)}{RT}$$
 (9)

胶质沥青是否发生沉积的判断条件是: $\ln f_a\geq \ln f_a^*$ 即胶质沥青液相逸度大于沥青固相逸度,则胶质沥青发生沉积; $\ln f_a<\ln f_a^*$ 即胶质沥青液相逸度小于沥青固相逸度,则胶质沥青不发生沉积; $\ln f_a=\ln f_a^*$ 对应于胶质沥青的沉积初始压力。

1.4 热力学计算结果

热力学模型计算选取B油田原油组分组成实验分析数据,进行原油组分拟特征化,利用热力学模型进行求解,见表1~3。

表1 B油田原油组分组成实验分析数据

组 分	摩尔组成 /%	组 分	摩尔组成 /%
CO <sub>2</sub>	0	C <sub>18</sub>	2.83
N <sub>2</sub>	0	C <sub>19</sub>	2.58
C <sub>1</sub>	0	C <sub>20</sub>	2.44
C <sub>2</sub>	0.17	C <sub>21</sub>	2.17
C <sub>3</sub>	0.64	C <sub>22</sub>	1.94
iC <sub>4</sub>	0.20	C <sub>23</sub>	1.92
nC <sub>4</sub>	1.21	C <sub>24</sub>	1.73
iC <sub>5</sub>	0.73	C <sub>25</sub>	1.67
nC <sub>5</sub>	1.67	C <sub>26</sub>	1.52
C <sub>6</sub>	3.59	C <sub>27</sub>	1.57
C <sub>7</sub>	5.53	C <sub>28</sub>	1.60
C <sub>8</sub>	8.25	C <sub>29</sub>	1.62
C <sub>9</sub>	6.79	C <sub>30</sub>	1.57
C <sub>10</sub>	5.84	C <sub>31</sub>	1.17
C <sub>11</sub>	4.83	C <sub>32</sub>	1.13
C <sub>12</sub>	4.41	C <sub>33</sub>	0.85
C <sub>13</sub>	4.44	C <sub>34</sub>	0.75
C <sub>14</sub>	4.11	C <sub>35</sub>	0.66
C <sub>15</sub>	4.25	C <sub>36+</sub>	7.14
C <sub>16</sub>	3.20	合计	100
C <sub>17</sub>	3.28	—	—

在目前渤海B油田平均地层压力30 MPa, 油藏温度120 ℃左右条件下,计算得出 $\ln f_a\leq \ln f_a^*$ ,即胶质沥青液相逸度大于胶质沥青固相逸度,则胶质沥青发生沉积。

表2 原油组分拟特征化结果

组分	摩尔组成	分子量/(g·mol <sup>-1</sup> )	临界温度/K	临界压力/MPa	熔解温度/K	偏心因子	溶解焓/(J·mol <sup>-1</sup> )
Pl(C1-C3)	0.008 1	41.153 1	356.284 0	4.320 0	191.543 82	0.100 0	5 395.029 1
P2(C4-C6)	0.074 0	76.196 9	478.156 9	3.370 0	154.577 48	0.150 0	8 363.586 1
P3(C7-C10)	0.264 1	114.266 6	583.392 7	2.800 0	230.804 32	0.250 0	15 212.076 7
P4(C11-C15)	0.220 4	174.837 6	680.588 5	2.060 0	307.011 92	0.370 0	25 684.913 8
P5(C16-C20)	0.143 3	247.566 6	757.812 1	1.580 0	329.442 20	0.560 0	31 090.093 3
P6(C21-C25)	0.094 3	311.327 7	812.261 1	1.290 0	243.270 59	0.750 0	29 053.155 0
P7(C26-C30)	0.078 8	371.611 7	857.215 0	1.080 0	275.970 32	0.910 0	37 904.776 0
P8(C31A+)	0.045 6	422.188 6	891.438 2	0.940 0	228.925 88	1.040 0	35 268.523 6
P9(C31B+)	0.071 4	580.338 3	912.100 0	0.870 0	290.530 32	1.200 0	73 894.875 3

表3 胶质沥青沉积条件计算结果

组分	逸度系数( $\varphi$ )		液相逸度( $f_a^*$ )		固相逸度( $f_a$ )		$\ln(f_a^*)$		$\ln(f_a)$	
P9(C31B+)	$\Phi_9$	0.111 7	$f_{a9}^*$	0.239 3	$f_{a9}$	0.137 9	$\ln(f_{a9}^*)$	-1.430 1	$\ln(f_{a9})$	-1.981 0

2 单井径向流模型的建立

由热力学计算模型得知B油田胶质沥青液相逸度大于胶质沥青固相逸度,易发生胶质沥青沉积。开展胶质沥青沉积数模研究分析<sup>[8-10]</sup>,结合近井地带压力梯度分布,得出油井胶质沥青沉积规律,以及胶质沥青在产层流体流动中对产能的影响。

2.1 数值模拟理论基础

运用三相平衡原理,当油藏条件改变打破平衡

时,便发生反应,产生胶质沥青沉积。

$$C_i=\varnothing\rho_jS_j\Delta X_{ji} \tag{10}$$

$j=w,o,g$

式中: $C_i$ 为反应 $i$ 的浓度因子; $\varnothing$ 为孔隙度,%; $\rho_j$ 为 $j$ 相密度,g/cm<sup>3</sup>; $S_j$ 为 $j$ 相饱和度,%。胶质沥青质析出反应方程式平衡常数见表4。

$$\Delta X_{ji}=X_{ji}-X_{ji\text{平衡}} \tag{11}$$

式中: $X_{ji}$ 为组分 $i$ 在 $j$ 相中的摩尔分数; $X_{ji\text{平衡}}$ 为相平衡常数 $K$ -value计算的平衡摩尔分数。

表4 胶质沥青质析出反应方程式平衡常数

Phase	Water	C <sub>1</sub> -C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub> -C <sub>30</sub>	C <sub>31</sub> <sup>A+</sup>	C <sub>31</sub> <sup>B+</sup>	DEP_ASP
*STOREAC	0	0	0	0	1	0
*STOPROD	0	0	0	0	0	1

注:\*STOREAC 为反应物,0 不参与反应,1 参与反应; $C_{31}^{A+}$ 为溶于油的沥青;\*STOPROD 为生成物,0 不生成该物,1 生成该物; $C_{31}^{B+}$ 为形成沉淀的沥青;DEP\_ASP 为固相;Water 为水相; $C_1$ - $C_5$  为碳 1~碳 5 组分; $C_6$ - $C_{30}$  为碳 6~碳 30 组分; $C_{31}^{A+}$ 为非沉降组分; $C_{31}^{B+}$ 为胶质沥青组分。

胶质沥青沉积造成渗透率降低的理论:生产过程中,随着流体的注入/采出,储层内外压差发生变化,孔隙受到压缩/膨胀影响而体积改变,特别是有沥青沉积的油藏,孔隙度变化更大。而渗透率与孔隙度有一定的函数关系,孔隙度的变化也会使渗透率随之变化。

$$k=k_0\exp[k_{mul}(\frac{\phi-\phi_0}{1-\phi_0})] \tag{12}$$

式中: $k$ 为变化后的渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>; $k_0$ 为初始渗透率,10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>; $\phi$ 为变化后的孔隙度,%; $\phi_0$ 为初始孔隙度,%; $k_{mul}$ 为倍乘系数。

2.2 数值模型建立

采用单井径向流模型模拟近井地带随着生产开发进行胶质沥青的沉积规律。

单井径向流模型:

$R\times J\times K$ :50×1×10

半径:300 m

近井带网格半径:0.2 m

渗透率:13×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>

孔隙度:25%

深度:3 500 m

温度:120 ℃

原始平均地层压力:47 MPa

3 模型结果

3.1 压力对胶质沥青沉积量的影响

随着油田开发生产时间的延长,近井带压力逐步下降,胶质沥青在近井带析出并开始沉积,之后沉积量逐渐增大,同时渗透率大幅减小,见图1。

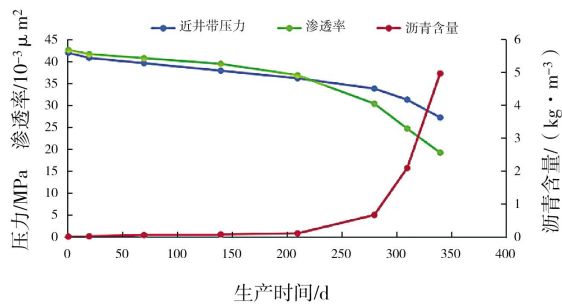


图1 生产中近井带压力、渗透率、胶质沥青沉积量变化关系

当压力下降到36~40 MPa时沥青开始析出,同时近井带渗透率大幅下降;压力继续下降胶质沥青析出速度增加,渗透率下降幅度也增大;当压力下降到28~33 MPa时,胶质沥青大量沉积造成地层堵塞,压力下降变慢,渗透率下降幅度变小,见图2。

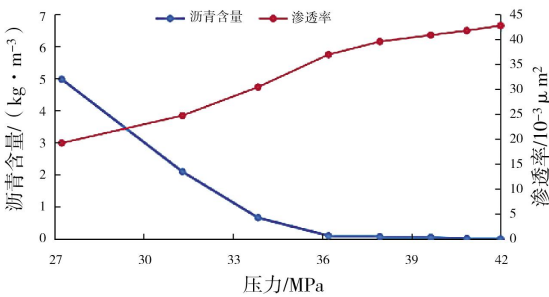


图2 不同地层压力条件下渗透率、胶质沥青沉积量变化关系

3.2 胶质沥青沉积对产量的影响

分别对15,50,75 m<sup>3</sup>/d不同产量条件下进行胶质沥青沉积预测,可知产量越低,胶质沥青沉积量越大,说明产量降低导致地下渗流降低,增大了沉积时间,使得胶质沥青沉积量增大,见图3。

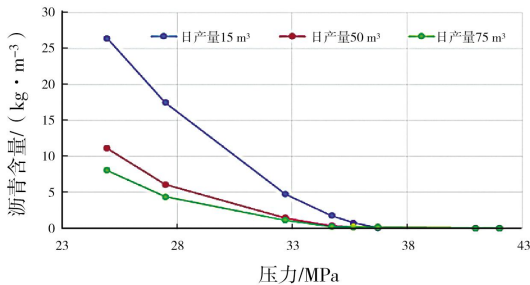


图3 不同产量条件下胶质沥青沉积情况

此外,当有胶质沥青析出时,稳产时间变短,产

油量大幅下降,下降幅度高达84.64%,见图4。

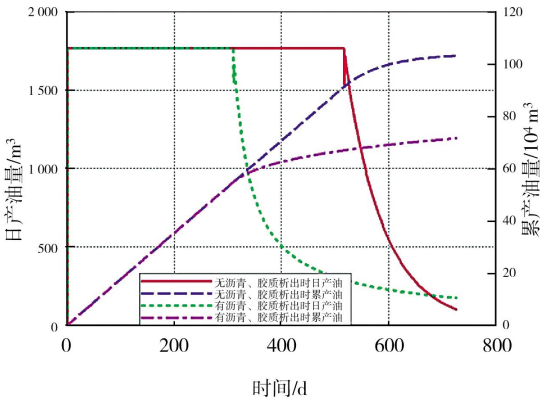


图4 胶质沥青沉积对产量影响规律

3.3 胶质沥青质沉积对储层伤害模拟

对比油井生产200 d和生产400 d近井地带地层压力、沉积量分布和渗透率变化情况,不难发现随着油井生产时间的增加,近井带压力下降,胶质沥青在近井带开始沉积,同时近井带渗透率也开始降低,对储层渗透率伤害增大,见图5。

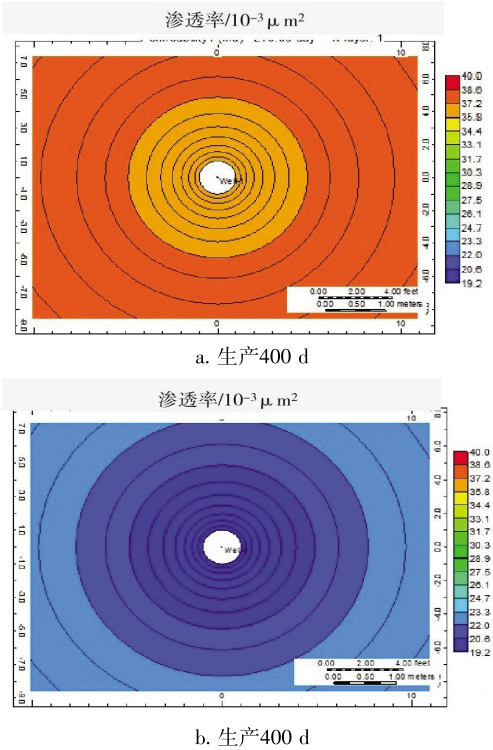


图5 近井地带渗透率分布

4 结论

- (1)通过热力学模型计算,B油田胶质沥青液相逸度大于胶质沥青固相逸度,容易发生胶质沥青质沉积。
- (2)构建单井径向流模型模拟(下转第 90 页)

测含水率非常接近。为了进一步验证卡尔费休法测定含油土壤含水率的准确性,取烘干土壤加外水做回收率实验,实验结果见表3。

表3 卡尔费休法测定含油土壤含水率的准确性实验		
加水量 / $\mu\text{L}$	回收量 / $\mu\text{L}$	回收率 /%
10	9.87	98.7
20	20.5	102.5
30	30.3	101.0
40	39.7	99.25

由表3看出,用卡尔费休法测定含油土壤含水率,含油土壤不会与卡尔费休试剂反应而产生误差,回收率在98.7%~102.5%之间,说明卡尔费休法测定含油土壤含水率准确性较高。

2 结论

(1)烘干失重法测定含油污泥或含油土壤含水率时,样品中的轻质石油烃也会挥发,且油品不同,烘干损失系数也不同,造成了烘干失重法测定含油污泥或含油土壤实验步骤繁琐、耗时较长和测试结果偏高。用卡尔费休法直接测定含油污泥或含油土壤含水率的分析方法,简便、快速、实用,测定结果重现性好,准确度高。

(2)含油污泥或含油土壤样品加入到卡尔费休

滴定杯中会有一些不溶物,但这些不溶物很容易随甲醇废液排出,并不会对卡尔费休仪造成损坏。

参考文献:

[1] 朱嘉卉.含油污泥的理化特性研究与分析[D].杭州:浙江大学,2014.

[2] 刘五星,骆永明,腾应,等.我国部分油田土壤及油泥的石油污染初步研究[J].土壤,2007,39(2):247-251.

[3] 邓绍云,徐学义,邱清华.我国石油污染土壤修复研究现状与展望[J].北方园艺,2012(14):184-190.

[4] WU BB, LAN Tian, LU DN, et al. Ecological and enzymatic responses to petroleum contamination [J]. Environmental Science: processes and impacts, 2014, 16(6):1501-1509.

[5] 侯梅芳,潘栋宇,黄赛花,等.微生物修复土壤多环芳烃污染的研究进展[J].生态环境科学,2015,23(7):1233-1238.

[6] 童玲.石油污染含水介质的水理和力学特征研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.

[7] 李梅.含水介质中石油的残留及其水理性质研究[D].青岛:中国海洋大学,2008.

[8] 陈伟胜,童玲,唐国斌.石油污染土壤含水率的测定[J].华北水利水电学院学报,2012,33(4):93-96.

[9] 李占元,任长青,易洪.卡尔·费休法测定食品中的含水量[J].中国计量,2001,(11):51-52.

(编辑 韩 枫)

(上接第 69 页)胶质沥青质沉积规律,研究结果表明:胶质沥青质的析出和沉积受地层压力影响明显。胶质沥青质开始析出的地层压力范围为36~40 MPa,胶质沥青沉积速度加快的地层压力范围为28~33 MPa。

(3)随着油井生产时间增加,近井带压力下降,胶质沥青在近井带开始沉积,同时近井带渗透率也开始降低,对储层渗透率伤害增大,对油井产能影响明显,油井产能下降幅度可达80%以上。

参考文献:

[1] 卢贵武,李英峰,宋辉,等.石油沥青质聚沉的微观机理[J].石油勘探与开发,2008,35(1):67-72.

[2] 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.

[3] 蒲万芬.油田开发过程中的沥青质沉积[J].西南石油学院学报,1999,21(4):38-41.

[4] 贾英,孙雷,孙良田,等.油藏中沥青质沉积机理研究

[J].西南石油学院学报,2006,28(6):60-64.

[5] 钱坤,杨胜来,刘盼.原油沥青质初始沉淀压力测定与模型化计算[J].断块油气田,2014,21(4):775-778.

[6] 胡玉峰,杨兰英,郭天民,等.用标度方程预测沥青质沉淀点[J].高校化学工程学报,2001,15(6):574-577.

[7] 林雄森,胡玉峰,马昌峰,等.状态方程法用于原油沥青质沉淀的计算[J].石油大学学报(自然科学版),1999,23(5):70-73.

[8] 吴诗平,鄢捷年,赵凤兰.原油沥青质吸附与沉积对储层岩石润湿性和渗透率的影响[J].石油大学学报(自然科学版),2004,28(1):36-40.

[9] 孙业恒.沥青质伤害油藏数值模拟研究[J].油气地质与采收率,2011,18(1):65-68

[10] 向敏,宫敬,杨毅.沥青质沉淀中的改进固相模型研究[J].西南石油大学学报,2014,36(3):133-138.

(编辑 谢 葵)