

长庆油田地层硫酸盐结垢预测模拟<sup>①</sup>袁益让<sup>\*</sup> 梁 栋 芮洪兴 王文洽

(山东大学)

巨全义 罗春勋

(长庆石油勘探局)

## 提 要

长庆油田主要开采层系中生界侏罗系延9、延10油层组,地层水中普遍含有钡、锶、钙离子,而且含量很高,作为该区注入水的洛河水含较高的硫酸根离子,引起硫酸盐垢沉淀。文中着重研究油田作业过程中BaSO<sub>4</sub>、SrSO<sub>4</sub>、CaSO<sub>4</sub>垢的沉积问题,利用电子计算机来模拟地层水和注入水混合引起的结垢趋势,提出了在油藏不同条件下硫酸盐垢的预测模型和高精度的数值模拟方法,研制了具有全面预测功能的软件系统。

主题词 油田开发 硫酸盐 结垢 数值模拟 长庆油田 预测

## 1 引 言

在油田开发过程中,随着注水采油的进行,采油井含水不断上升,特别在进入中、高含水期以后,地面集输系统、油井及注水地层的结垢问题日趋严重,造成管道和地层堵塞,严重影响原油的开发<sup>[1]</sup>。导致结垢的主要原因是注入水和地层水的严重不相容性以及采油过程中压力和温度的急骤变化。

长庆油田主要开采层系中生界侏罗系延9、延10油层组,地层水中普遍含有钡、锶、钙离子,而且含量很高,该区的注入水洛河水含较高的硫酸根离子。长庆马岭油田南区的油井调查表明,在调查的112口井中,含钡离子井59口。在南区所辖的试验区调查62口井,含钡离子井47口。一般Ba<sup>2+</sup>含量都在数百mg/L,少数井达1000~1700mg/L,如南试验区75井为1674mg/L,南11井为1612mg/L,南一区的10-15井为1014mg/L。这些含钡离子井的地层水,一般都不含硫酸根离子。作为注入水的洛河层水,含SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>为1051mg/L。另外,不含Ba<sup>2+</sup>的井,一般都含较高的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,如南一区的7-15井含SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>高达8019mg/L。实际调查还表明,马岭油田南区大部分计量站都存在结垢问题,特别是南试验区,七个站中五个站出现了硫酸钡结垢。对垢样分析,其中硫酸钡占23.95%~77.7%。在调查的112口井中,结垢井38口<sup>[2,3]</sup>。地层抽样分析,采油地层中有新垢生成,地层产生沉淀堵塞,对地层渗透能力造成损害<sup>②</sup>。

不考虑可能引起的结垢问题就开始注水是相当常见的,这种忽视潜在结垢问题的主要原

① 国家攀登计划和中国石油天然气总公司资助项目。

\* 袁益让,1958年毕业于山东大学数学系。现任山东大学教授。通讯处:山东省济南市。邮政编码:250100。

② 徐安新等.长庆低渗透注水油田——注水地层结垢机理研究.长庆石油勘探局,1992。

因是缺少一个可以精确预测由注入水和原油藏物质间的不相容性所产生的结垢问题的计算模式。许多文献<sup>[4,5]</sup>把油田主要结垢的形成描述成水的成份和热力学条件的一个函数,然而,这些函数都是在很强局限条件下获得的经验公式,不能适用于评价大规模注水时所遇到的水的不相容性问题,不适用于对注水时所预料到的各种共结垢问题进行全面精确的评价。对油田结垢的计算机数值预测是有效防垢处理的先决条件,只有准确合理地获得油田地层结垢的趋势,才能提出开采的合理方法和完善的防垢处理方法。

本文针对长庆油田的实际情况着重研究了油田作业过程中的  $\text{BaSO}_4$ 、 $\text{SrSO}_4$ 、 $\text{CaSO}_4$  垢沉积问题,提出了在油藏不同条件下硫酸盐结垢的预测模型和高精度的计算机数值模拟方法,研制了具有全面预测功能的软件系统,实例预测结果同国外文献比较,结果稳定、可靠,对长庆油田实际水样进行了系统预测,结果合理,同实验结果和实测结果相一致。

## 2 基本原理与预测模型

### 2.1 溶度积方程

沉淀物的溶度积  $K_{sp}$  是一个非常重要的量,在预测结垢趋势问题中具有十分重要的意义<sup>[6]</sup>。由于从油井上部到油藏内部,温度的变化非常大,必须考虑  $K_{sp}$  随温度的变化规律。在温度变化情况下,组份  $i$  的质量摩尔比热  $C_{pi}$  由下述关系给出

$$C_{pi} = A + BT + \frac{C}{T^2}$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为常数。利用标准热力学积分公式推出组份  $i$  的自由焓  $\Delta G_i^\circ$  为

$$\Delta H_i^\circ = \int_{C_{pi}} dT = AT + \frac{1}{2}BT^2 - \frac{C}{T} + I_h$$

$$\Delta G_i^\circ = -T \int \frac{\Delta H_i^\circ}{T} dT = -AT \ln T - \frac{1}{2}BT - \frac{C}{2T} + I_h T + I_g$$

进而

$$\ln K_{sp} = \frac{\Delta A \ln T}{R} + \frac{\Delta B \cdot T}{2R} + \frac{\Delta C}{2RT^2} - \frac{\Delta I_h}{RT} - \frac{\Delta T_g}{R} \quad (1)$$

式中  $T$  为绝对温度,  $R$  为一固定常数,系数  $\Delta A$ 、 $\Delta B$ 、 $\Delta C$ 、 $\Delta T_h$ 、 $\Delta T_g$  需要以待定的方式,从已知的数据求得。

压力对于  $K_{sp}$  的影响是非常小的,但是,由于油井上部到油层之间的压力变化足有上百个大气压,因此,在计算  $K_{sp}$  时,压力的影响成为不可忽视的因素。根据热力学规律可得到关系

$$\ln \frac{K(P)}{K(I)} = -\frac{\Delta V^\circ P}{RT} + \frac{\Delta K^\circ P^2}{2RT} \quad (2)$$

式中  $K(P)$  为在  $P$  bar ( $10^5$  Pa) 压力下的  $K_{sp}$  值;  $K(I)$  为 1 bar ( $10^5$  Pa) 压力下的  $K_{sp}$  值;  $\Delta K^\circ$ 、 $\Delta V^\circ$  可以从离子的溶解热力学以及固体的密度求得。在整个采油过程中压力、温度都要发生变化,且温度的影响较大。

### 2.2 Pitzer 方程

Pitzer 方程<sup>[7]</sup>是关于离子相互作用的有效处理方法,它的起源可追回到著名的 Debye-Huckel 方程,它既考虑到溶液离子强度的影响,又考虑了单个离子的摩尔量的影响,从而特殊

离子对于电解质性质的影响得到充分体现,它已被成功地用于计算不同情况下电解质的性质。

Pitzer 方程包括过剩自由 Gibbs 能方程,渗透系数方程和平均活度系数方程。用  $\gamma_{MX}$  表示混合溶液中电解质 MX 的平均活度系数,由下式给出

$$\begin{aligned} \ln \gamma_{MX} = & |Z_M Z_X| f + \frac{2v_M}{v} \sum_a m_a (B_{Ma} + \mu C_{Ma} + \frac{v_X}{v_M} \theta_{Xa}) + \\ & + \frac{2v_X}{v} \sum_a (B_{cX} + \mu C_{cX} + \frac{v_M}{v_X} \theta_{Mc}) + \sum_{c,a} m_c m_a [ |Z_M Z_X| B'_{ca} + \\ & + \frac{1}{v} (2v_M Z_M C_{ca} + v_M \psi_{Mca} + v_X \psi_{cax}) ] + \frac{1}{2} \sum_{c,c'} m_c m_{c'} + \\ & + [ \frac{v_X}{v} \psi_{c'c} + |Z_M Z_X| \theta_{c'c} ] + \frac{1}{2} \sum_{a,a'} m_a m_{a'} ( \frac{v_M}{v} \psi_{Ma a'} + |Z_M Z_X| \theta_{a a'} ) \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $m_i$  为离子  $i$  的摩尔浓度,  $a, a'$  表示溶液中的阴离子,  $c, c'$  表示溶液中的阳离子,  $Z_M, Z_X$  表示离子价,  $v_M, v_X$  为一个分子中阳、阴离子的个数,  $v = v_M + v_X, \mu = \sum m_c z_c = \sum m_a |Z_a|$ 。方程右端由两部分组成,第一部分为修正的 Debye—Huckel 项表示距静电力,其中

$$f = -A_\varphi \left[ \frac{I^{1/2}}{1 + 1.2I^{1/2}} + \frac{2}{1.2} \ln(1 + 1.2I^{1/2}) \right] \quad (4)$$

这里  $A_\varphi$  为 Debye—Huckel 系数,  $I$  为离子强度。其它项表示离子间的短距相互作用和溶剂结构的影响,其中

$$\begin{aligned} B_{ij} = & \beta_{ij}^{(0)} + \frac{\beta_{ij}^{(1)}}{\alpha_1^2 I} [1 - (1 + \alpha_1 I^{1/2}) \exp(-\alpha_1 I^{1/2})] + \\ & + \frac{\beta_{ij}^{(2)}}{\alpha_1^2 I} [1 - (1 + \alpha_2 I^{1/2}) \exp(-\alpha_2 I^{1/2})] \end{aligned} \quad (5)$$

$$B'_{ij} = \frac{\partial B_{ij}}{\partial I} \quad (6)$$

在预测问题中,混合液往往含有  $Ba^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+}, SO_4^{2-}, Na^+, Cl^-, Mg^{2+}$  等离子,而方程(3)右端许多系数关于组份、温度和压力的关系是未知的,甚至在实际温度和压力下系数的值也是很难测出的。这就需要采用优化的方法确定  $BaSO_4, CaSO_4, SrSO_4$  的平均活度系数值。

### 2.3 溶解度关系方程

在混合溶液中,当阳离子  $M^{2+}$  和阴离子  $X^{2-}$  形成沉淀物 MX 时



热力学溶度积  $K_{sp, MX}$  可表示为

$$K_{sp, MX} = m_M m_X \gamma_M \gamma_X \gamma_{H_2O}^n = Q_{sp, MX}^2 \gamma_{MX}^2 \gamma_{H_2O}^n \quad (7)$$

其中  $\gamma_M, \gamma_X$  为 M 和 X 的活度系数,  $\gamma_{H_2O}$  为水的活度系数,  $Q_{sp, MX}$  为计算化学溶解度的平方根。由此推得

$$-\ln Q_{sp, MX} = -\frac{1}{2} \ln K_{sp, MX} + \ln \gamma_{MX} + \frac{n}{2} \ln \gamma_{H_2O} \quad (8)$$

对于许多溶液  $(Ba, Sr, Ca)SO_4 - H_2O, (Ba, Sr, Ca)SO_4 - NaCl - H_2O, (Ba, Sr, Ca)SO_4 - MgCl_2 - H_2O$ , 大量一定温度压力下  $BaSO_4, SrSO_4, CaSO_4$  的溶解度数据已被测出,由此获得一

定温度、压力下的  $Q_{sp}$ , 利用(1)(2)(3)(8)优化迭代, 可获得  $\gamma_{MX}$ ,  $Q_{sp,MX}$ ,  $K_{sp,MX}$  与组份、离子强度、温度和压力的关系。

## 2.4 预测模型

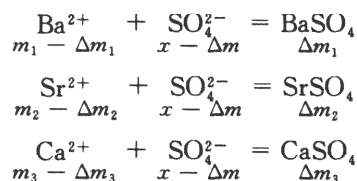
为描述某一物质 MX 从溶液中的沉淀, 有两个概念非常重要, 一个是过饱和度 (SP), 另一个是沉淀量 (PP)。物质 MX 的过饱和度  $SP_{MX}$  反映了其在溶液中的稳定程度, 其定义为

$$SP_{MX} = \frac{(m_M m_X)^{0.5}}{Q_{sp,MX}} \quad (9)$$

若  $SP_{MX} > 1$ , 则含有 MX 的溶液是过饱和的, 将发生沉淀; 相反, 若  $SP_{MX} < 1$ , 则 MX 在溶液中是稳定的, 其中若有固态 MX, 将趋向溶解, 若  $SP_{MX} = 1$ , 则离子在溶液中是处于平衡状态。

物质 MX 的沉淀量  $PP_{MX}$  是指从最初的过饱和溶液到平衡建立起来的所最终形成的固体 MX 的量,  $PP_{MX} = m_{Xi} - m_{Xe} = m_{Mi} - m_{Me}$ , 其中下标 i, e 分别表示该量是最初或平衡时的浓度。

混合液中若  $SP_{BaSO_4}$ 、 $SP_{SrSO_4}$ 、 $SP_{CaSO_4}$  都大于 1, 即过饱和的, 则会同时发生沉淀, 直到三种盐都建立起溶解、沉淀平衡, 即



其中  $m_1, m_2, m_3$  为  $Ba^{2+}, Sr^{2+}, Ca^{2+}$  的最初浓度,  $X$  为  $SO_4^{2-}$  的最初浓度,  $\Delta m_1, \Delta m_2, \Delta m_3$  分别为  $BaSO_4, SrSO_4, CaSO_4$  的沉淀量,  $\Delta m = \Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3$ 。我们有平衡方程

$$Q_{SP, BaSO_4} = \{(m_1 - \Delta m_1)[X - (\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3)]\}^{1/2} \quad (10)$$

$$Q_{SP, SrSO_4} = \{(m_2 - \Delta m_2)[X - (\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3)]\}^{1/2} \quad (11)$$

$$Q_{SP, CaSO_4} = \{(m_3 - \Delta m_3)[X - (\Delta m_1 + \Delta m_2 + \Delta m_3)]\}^{1/2} \quad (12)$$

## 2.5 共沉淀数值计算方法

平衡方程(10)(11)(12)为非线性方程组, 采用牛顿迭代法来求解。(10)(11)(12)写成如下形式:

$$F(x) = [f_1(x_1, x_2, x_3), f_2(x_1, x_2, x_3), f_3(x_1, x_2, x_3)] = 0 \quad (13)$$

式中  $x_1, x_2, x_3$  代表  $BaSO_4, SrSO_4, CaSO_4$  的沉淀量(摩尔浓度)

$$f_i = Q_i - \{(M_i - x_i)[X - (x_1 + x_2 + x_3)]\}^{1/2} \quad (14)$$

取  $X_0$  为初始近似

$$DF(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \frac{\partial f_1}{\partial x_2}, \frac{\partial f_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}, \frac{\partial f_2}{\partial x_2}, \frac{\partial f_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1}, \frac{\partial f_3}{\partial x_2}, \frac{\partial f_3}{\partial x_3} \end{bmatrix}$$

对  $k=1, 2, \dots$ , 做

$$1^\circ \text{求 } Y_k \in R^3, \text{使 } DF(X_k)Y_k = F(X_k)$$

$$2^\circ X_{k+1} = X_k - \omega_k Y_k$$

$$3^\circ \text{若 } \frac{\|X_{k+1} - X_k\|}{\|X_k\|} \leq \epsilon, \text{则结束, 否则执行 } 1^\circ.$$

其中  $\omega_k$  为松弛因子,  $\epsilon$  为精确度。

在实际过程中, 混合液含有许多离子成份, 许多沉淀物同时析出, 不仅平衡方程为非线性方程组, 而在沉淀的过程中,  $Q_{SP, MX}$  又随温度、压力和组份发生变化, 平衡方程实际为变化着的方程组, 这就给共沉淀量的计算带来极大困难。我们采用高精度的初值、非线性方程迭代求解和整个过程共沉淀优化处理的模拟方法(计算流程图如图1), 研制了具有全面预测功能的预测软件(系统模块结构示意图如图2)。

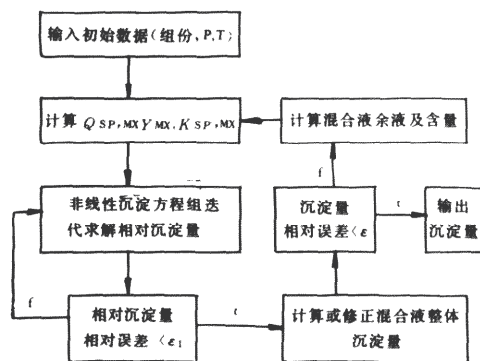


图1 计算流程图

Fig. 1 A flow chart of the computing procedure

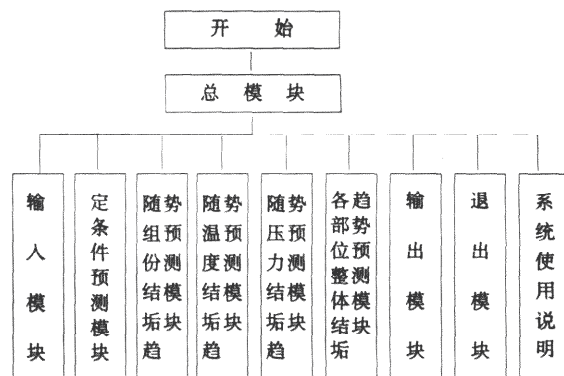


图2 系统模块结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of the overall system module

### 3 预测结果分析

以文献 O. J. Vetter 等<sup>[1]</sup>、M. D. Yuan 等<sup>[8]</sup>和 G. Atkinson 等<sup>[9]</sup>的计算实例进行数值预测模拟, 模式计算中所用的水样成份如表1。

表1 模式计算中所用的水样成份(单位: mg/L)  
Table 1 The composition of the used water samples

水的名称 水的成份	RW. 1 水	RW. 2 水	SW. 1 水	SW. 2 水	A 水	B 水	C 水
Na <sup>+</sup>	98512	98512	72076	772	43817	39292	44275
Mg <sup>2+</sup>	511	511	464	188	1422	1270	1215
Ca <sup>2+</sup>	21663	2166	1805	289	7930	6977	6967
Sr <sup>2+</sup>	1106	1106	0.5	0.5	560	565	550
Ba <sup>2+</sup>	495	495	0.7	0.7	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	192190	159276	113483	1490	85555	76148	83957

续表

水的名称 水的成份	RW.1 水	RW.2 水	SW.1 水	SW.2 水	A 水	B 水	C 水
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.5	1.5	2348	915	210	540	100
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	363	3.63	726	145.2	232	311	360
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
K <sup>+</sup>	524	524	0.5	0.5	0	0	0
Fe <sup>2+</sup>	485	485	0.5	0.5	0	0	0

预测结果和文献 1,8,9 结果比较见表 2、表 3。

表 2 SrSO<sub>4</sub> 垢计算结果比较 (T=230 F, p=1133.9kg/cm<sup>2</sup>)

Table 2 The results of predictions for SrSO<sub>4</sub> scale

预测方法	J.	Y.	FO.	SD.		
水的名称	定性结论	过饱和度	定性结论	定性结论	过饱和度	沉淀量(mg/L)
A 水	微沉淀	1.04	微沉淀	微沉淀	1.05	32
B 水	沉淀	1.70	沉淀	沉淀	1.73	467
C 水	不沉淀	0.72	不沉淀	不沉淀	0.74	0.0

表 3 硫酸盐结垢模拟比较表

Table 3 Comparisons of the simulated predictions for the sulfate scale

注入水/地层水 (%)	注入水 SW.1 地层水 RW.1 混合 p=20266kPa, T=100℃												注入水 SW.2 地层水 RW.1 混合, p=20266kPa T=100℃											
	BaSO <sub>4</sub> (mg/L)				SrSO <sub>4</sub> (mg/L)				CaSO <sub>4</sub> (mg/L)				BaSO <sub>4</sub> (mg/L)				SrSO <sub>4</sub> (mg/L)				CaSO <sub>4</sub> (mg/L)			
	V.	Y.	A.	SD.	V.	Y.	A.	SD.	V.	Y.	A.	SD.	V.	Y.	A.	SD.	V.	Y.	A.	SD.	V.	Y.	A.	SD.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10		480	450	483	0	0	0	0	0	0	0	0	0	175	198	188	0	0	0	0	0	0	0	0
20	620	620	528	619	0	0	127	95	140	30	0	0	0	360	384	390	0	0	0	0	0	0	0	0
30			556	0	0		449					0	525	505	449	509	0	0	0	0	0	0	0	0
40	500	480	410	482	0	0	556	486	880	410	0	261	475	480	405	479	0	0	0	0	5	0	0	0
50			345	403	0	0	567	405				633	420	410	343	406	20	0	0	100	70	0	0	0
60	390	340	276	323	0	0	418	318	1500	1200	255	981	335	340	275	327	22	0	8	179	150	0	0	0
70			200	243	0	0	274	226				1282	255	260	208	247	7	70	38	185	245	0	0	0
80	160	170	139	162	0	0	143	129	1940	1425	455	1482	170	170	139	165	0	100	58	120	340	5	0	0
90			69	81	0	0	19	23	1960	1400	73	1412	70	70	70	82	0	60	52	0.94	440	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0	0	0	1040	10	0	355	0	0	0	0	0	0	0	0	160	0	0	0

其中预测方法 V. = Vetter<sup>[1]</sup>, Y. = Yuan<sup>[8]</sup>, A. = Atkinson<sup>[9]</sup>, J. = Jacques<sup>[10]</sup>, FO. = Field Observation<sup>[8]</sup>, SD. = 我们研制的软件系统。从预测结果表 2、表 3 可以看出,我们的计算结果

稳定,并且体现了实际过程中的共沉淀实际现象。

#### 4 长庆油田油井结垢趋势预测

长庆马岭油田南区主要开采层系中生界侏罗系延 9、延 10 油层组,地层水中普遍含钡离子,而且含量很高,作为该区注入水的洛河水含较高的硫酸根。从 1979 年以来,在该区的 108、107、103、203 等计量站陆续发现硫酸盐结垢,后发现一些油井硫酸盐结垢<sup>[2,3]</sup>,地层抽样分析,采油地层中有新垢生成<sup>①</sup>。

比较典型的长庆马岭油田地层水与注入水的成份分析资料见表 4,油田地层压力和温度条件见表 5。

利用油田提供的水质资料(表 4),对南 75 井地层水、南 92 地层水和洛河注入水混合在地层条件(表 5)下进行系统预测,其中南 92 地层水和洛河注入水混合在地层条件 A 下整体预测结果见图 3。

对南 11 地层水和南 7-15 高硫酸根水混合,在地层条件 B 下的整体预测结果见图 4。

预测结果同实验结果和实测结果相一致(参见文献 2,3)。

表 4 典型的长庆马岭油田地层水与注入水水质资料

Table 4 Compositions of the formation and injected water in Changqing oilfield

离子特征	井号	主要离子含量(mg/L)							总矿化度 (g/L)	水型
		Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
高钡水	南 92 井	34575	5092	665	488	64371	0	203	105.39	CaCl <sub>2</sub>
	南 75 井	32866	6265	444	1674	64549	0	195	107.48	CaCl <sub>2</sub>
	南 11 井	40077	7343	837	1612	77566	0	149	127.58	CaCl <sub>2</sub>
高硫酸根水	南 7-15 井	16476	694	304	0	21398	8019	305	47.20	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
注入水	洛河水	758	67	31	0	445	1051	259	2.61	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

表 5 油田各部位压力(atm)及温度(°C)条件

Table 5 The pressure and temperature conditions of the oilfield

	油藏静压	井底流压	井口流压	地面压力	储层温度	井底温度	井口温度	地层温度
地层条件 A	140	50	10	1	60	50	25	20
地层条件 B	200	160	10	1	100	100	70	20

注: 1atm=101.325kPa。

① 徐安新等. 长庆低渗透注水油田——注水地层结垢机理研究. 长庆石油勘探局, 1992.

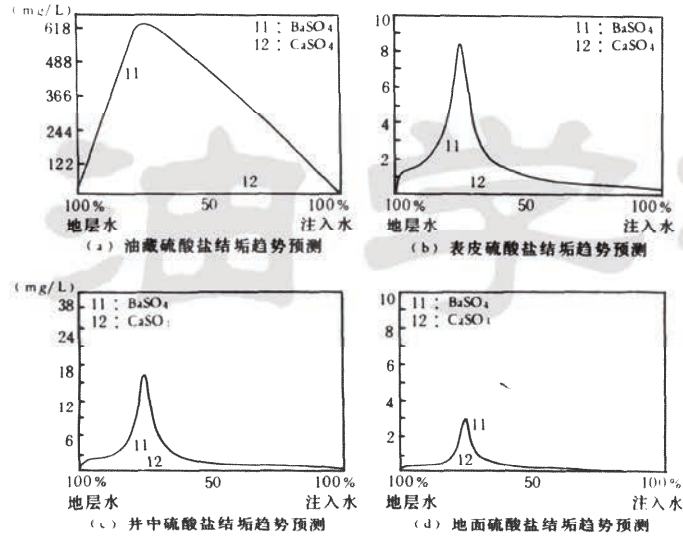


图 3 南 92 地层水和洛河注入水混合硫酸盐垢预测

Fig. 3 Predictions of sulfate scale after mixing formation water of Nan 92 Fm. with injected water of Luohe Fm.

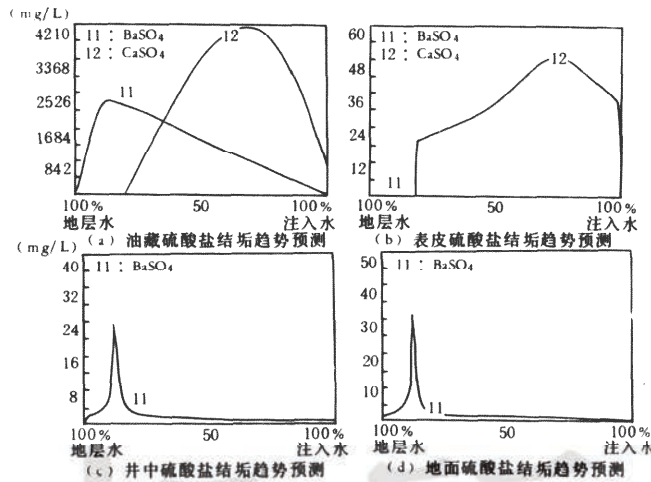


图 4 南 11 地层水和南 7-15 注入水混合硫酸盐垢预测

Fig. 4 Predictions of sulfate scale after mixing formation water of Nan 11 Fm. with injected water of Nan 7-15 Fm.

### 5 结 论

1. 高含钡、锶、钙离子地层水与含 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 较高的注入水具有不相容性,二者混合将生成硫酸盐沉淀。

2. 油藏各部位都将发生沉淀,地层内沉淀趋势最大。沉淀析出停留在何位置,还要受到结



晶和液体流动的影响。

3. 多种离子共存时,共沉淀发生。沉淀趋势受压力、温度、离子强度以及离子成份含量的影响。

4. 数值预测模拟适合于评价大规模注水时的共沉淀问题,有利于提出完善合理的防垢处理方案。

### 参 考 文 献

- [1] Vetter O J, Kandarpa V, Harowska A. Prediction of scale problems due to injection of incompatible water. *J. Pet. Tech.*, 1982, Feb. 273~284
- [2] 严衡文,吕耀明,徐安新. 石油学报,1986,(2)
- [3] 巨全义. 油田地层水中硫酸钡结垢的化学防治. 油田化学,1987,4(1) 9~15.
- [4] Vetter O J. How barium sulfate is formed; an interpretation. *J. Pet. Tech.*, 1975, Dec., 1515~1524.
- [5] Cowan J C, Weintritt D J. Water-formen scale deposits. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1976.
- [6] Raju K Atkinson G. Thermodynamics of soale mineral solubilities. *J. Chem. Eng. Data*, 35, 1990, 361~367.
- [7] Pitzer K S. Thermodynamics of electrolytes I. theoretical basis and general equations. *J. Phys. Chem.*, 77(2), 1973, 268~277.
- [8] Yuan M D, Todd A C. Prediction of sulfate scaling tendency in oilfield operations. SPE 18484, 1989.
- [9] Atkinson G, Raju K, Howell R D. Thermodynamics of scale prediction. SPE 21021, 1991, 209~214
- [10] Jacques D F, Bourland B I. A study of solubility of strontium sulphate. SPEJ, Apr., 1983, 292~300.

(修改稿收到日期 1994-12-19)

(编辑 杨 苗)

## PREDICTION AND SIMULATION ON SCALING TENDENCY OF SULFATE IN FORMATIONS IN CHANGQING OILFIELD

Yuan Yirang Liang Dong Rui Hongxing Wang Wenqia

(Shandong University)

Ju Quanyi Luo Chunxun

(Changqing Petroleum Exploration Bureau)

### Abstract

In Changqing oilfield, there is a large amount of  $Ba^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  in formation water and  $SO_4^{2-}$  in the injected water (Luo He water). Since 1979, the sulfate precipitation was discovered in many places of the oilfield. The problem about precipitation of  $BaSO_4$ ,  $SrSO_4$  and  $CaSO_4$  is considered in oilfield operation. The prediction model and the numerical simulation method for sulfate precipitation are studied.

**Key words** oilfield production sulfate scaling numerical simulation  
Changqing oilfield prediction