

高含硫气藏元素硫沉积对储集层的伤害

曾平¹, 赵金洲¹, 周洪彬²

(1. 西南石油学院; 2. 中国石化胜利油田黄河钻井总公司)

基金项目: 国家重点基础研究“973”项目(2001CB209108)

摘要: 元素硫是高含硫气藏开发的有害物质。随着气井的投产, 地层压力和温度沿径向不断降低, 在气流达到或超过含硫饱和度时, 元素硫将会从气流中析出, 并在储集层岩石的孔隙或喉道中沉积下来, 使得地层孔隙度和渗透率降低, 严重时造成气井的停产甚至报废。在推导了元素硫沉积对储集层伤害的模拟模型基础上, 分析了在高含硫气藏的开发过程中, 元素硫沉积的特征及对储集层物性的伤害情况, 发现元素硫在地层中的沉积主要在离井筒较近的范围之内, 且沉积量沿径向由井筒向地层深处逐渐减小; 沉积于孔隙的元素硫对储集层的伤害也主要在该区域之内, 越靠近井筒伤害程度越严重, 且随着生产时间的延长, 对储集层的伤害程度加速。图4表1参6

关键词: 含硫气藏; 元素硫; 沉积; 堵塞; 伤害

中图分类号: TE122

文献标识码: A

0 引言

开发高含硫气藏常存在3个棘手的问题, 即硫化氢的剧毒性、腐蚀性和元素硫在储集层中的沉积, 其中元素硫沉积是油藏工程师必须时刻关注的重要问题。在原始地层条件下, 元素硫一般以化合物(主要与硫化氢结合生成多硫化氢)的形式存在于流体中。当气井投入生产之后, 受到储集层温度和压力下降的影响, 多硫化氢分解产生硫化氢和单质的硫。在气流动力不足以携带元素硫颗粒的情况下, 这些析出的元素硫颗粒就会沉积到岩石的孔隙或喉道中, 使得储集层孔隙度减小、渗透率降低, 在一定条件下甚至完全堵塞渗流通道, 迫使气井停产。如中国华北油田的赵兰庄气藏, 在1976年试采时因对高含硫气藏开发认识不足, 储集层发生严重的元素硫沉积而被迫关井, 至今尚未投产^[1]。可见元素硫沉积对储集层的伤害是致命的, 也是该类气藏开发必须解决的关键问题之一。因此, 研究高含硫气藏元素硫沉积对地层的伤害, 能准确掌握储集层物性参数的变化情况, 为防止元素硫沉积和实施解堵措施提供必要的参考, 对指导该类气田的开发具有重要的意义。

目前, 众多学者在这方面的研究以室内实验研究为主。文献[2]用室内实验的方法研究元素硫在碳酸盐岩油藏中的沉积, 建立了元素硫沉积的模拟计算模型, 从实验观察和数值模拟的角度探讨了元素硫沉积对流体在岩心中流动的影响。文献[3]和文献[4]用岩心流动实验的方法, 从不同角度研究了元素硫沉积的特征, 前者是在文献[2]研究的基础上分析元素硫在天

然气和原油中的沉积以及对岩石渗透率的影响; 后者着重分析元素硫沉积对流体流动造成的伤害, 并给出了经验关系式。上述研究都建立在室内实验的基础之上, 没有对实际矿场的情况进行模拟。

本文推导了气井在生产过程中元素硫沉积对储集层伤害的模拟模型, 并通过实例分析了元素硫在储集层中的沉积特征及其对储集层的伤害情况, 得到了满意的结果。

1 元素硫沉积对储集层伤害的模拟模型

假设气体在地层中的渗流满足如图1所示的径向流模型, 地层温度恒定, 并取一微元体作为研究对象。

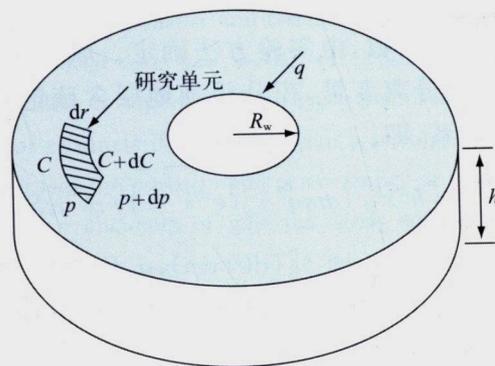


图1 气体渗流模型

设从气流中析出的元素硫为固态, 则由物质平衡原理可得, 所研究的微元体内经历 dt 时间后从饱和和气流中析出的固态元素硫的体积为:

$$\begin{aligned} dV_s &= qB_g dC dt / \rho_s = qB_g (dC/dp)_T dp dt / \rho_s \\ &= 4.983 \times 10^{-3} qB_g (dC/dp)_T dp dt \end{aligned} \quad (1)$$

由孔隙度定义可得:

$$d\phi = dV_s/V_m = dV_s/(2\pi rh dr) \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式得到:

$$d\phi = \frac{0.793 \times 10^{-3} q B_g (dC/dp)_T}{rh} \frac{dp}{dr} dt \quad (3)$$

设气体的渗流满足二项式定律的非线性渗流,即:

$$dp/dr = (\mu_g/K)v + \beta \rho_g v^2 \quad (4)$$

令 $\delta = (1 + \rho_g v \beta K / \mu_g)^{-1}$, δ 是与流速大小相关的非达西流动效应的一个校正系数,此处将其近似地视为常数,则(4)式可变为:

$$v = - (K\delta/\mu_g)(dp/dr) = 1.842 \times 10^{-2} q B_g / (hr) \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式得到:

$$d\phi/dt = 1.416 \times 10^{-3} q^2 \mu_g B_g^2 (dC/dp)_T / (\delta K h^2 r^2) \quad (6)$$

当气体动力不太强烈,只能对析出的固相硫颗粒的沉积具有干扰作用的条件下,元素硫颗粒的沉积将会延迟,则地层含硫饱和度(S_s)与地层孔隙度减小量的关系可近似表示为^[5]:

$$S_s = \Delta\phi + \tau(d\Delta\phi/dt) \quad (7)$$

文献[6]的研究认为,地层发生元素硫沉积时,储集层渗透率与含硫饱和度的关系可表示为:

$$K = K_0 e^{aS_s} \quad (8)$$

其中 a 为经验常数,由实验方法确定。联立(6)式、(7)式和(8)式并分离变量,积分得到地层含硫饱和度与时间的函数关系,即:

$$t = [h^2 r^2 / (amq^2)] (e^{aS_s} - 1) + a\tau S_s \quad (9)$$

其中 $m = 1.416 \times 10^{-3} [(dC/dp)_T \mu_g B_g^2 / (\delta K_0)]$

受元素硫沉积的影响,储集层孔隙度随时间的变化关系可表示为:

$$\phi = 1 - S_s + [\tau m q^2 / (h^2 r^2)] e^{aS_s} \quad (10)$$

特别地,当 $\tau=0$ 时,

$$\phi = \phi_0 - \frac{1}{a} \ln \left(\frac{amq^2}{h^2 r^2} t + 1 \right) \quad (11)$$

同样,可以得出渗透率与时间的关系函数:

$$K/K_0 = 1 + [amq^2 / (h^2 r^2)] (t + a\tau S_s) \quad (12)$$

当 $\tau=0$ 时,

$$K = K_0 \left(1 + \frac{amq^2}{h^2 r^2} t \right) \quad (13)$$

(10)式至(13)式给出了高含硫气藏在开采过程中由于固态元素硫沉积而引起的地层孔隙度和渗透率的变化规律表达式,为描述元素硫沉积对储集层的伤害提供了工具。

2 实例分析

某气藏属高含硫气藏,地层初始压力约为 44.6 MPa,地层温度 102.5 °C,储集层有效厚度 23.8m,地层孔隙度 9.3%,渗透率 21.26mD。其气体组分数据如表 1 所示。

表 1 某气藏天然气组分分析数据表

井号	相对密度	天然气组分(%)					其他	H ₂ S (g/m ³)
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	CO ₂	H ₂ S		
A1	0.661	76.70	0.04	0.04	6.46	16.21	0.54	231.93
A2	0.743	73.70	0.06	0.05	8.27	17.06	0.84	244.05

本文以 A1 井为研究对象,其产量恒为 20 万 m³/d。计算结果见图 2 至图 4。

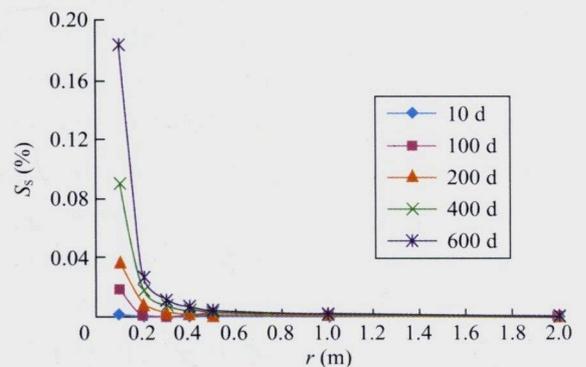


图 2 气井生产过程中地层含硫饱和度分布曲线

图 2 是元素硫在地层中沉积沿径向分布示意图,可见元素硫在地层中的沉积主要发生在离井筒较近的区域,且在忽略水动力的携带冲刷作用条件下,离井筒越近元素硫沉积越严重,反之元素硫的沉积就越弱。从时间上看,随着生产时间的延长,元素硫在地层中的沉积速率逐渐加快,且在达到一定的时间后地层含硫饱和度会迅速增加(文中曲线未列出)。元素硫沉积对储集层的伤害与其在地层中的沉积分布具有相同的趋势,即元素硫沉积对储集层的伤害是非均匀的,离井筒越近伤害程度越大,孔隙度和渗透率下降越严重,反之则伤害程度越小,从而形成孔隙度和渗透率沿径向分布的漏斗形状(见图 3、图 4)。

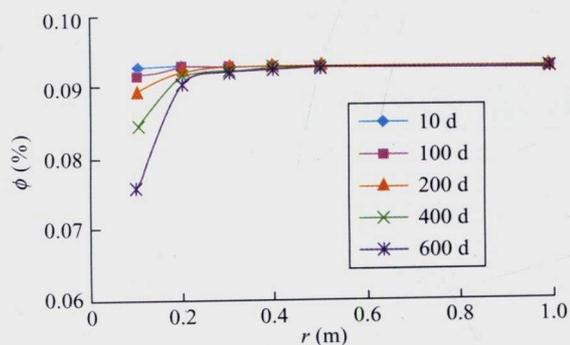


图3 气体渗流过程中孔隙度沿径向分布曲线

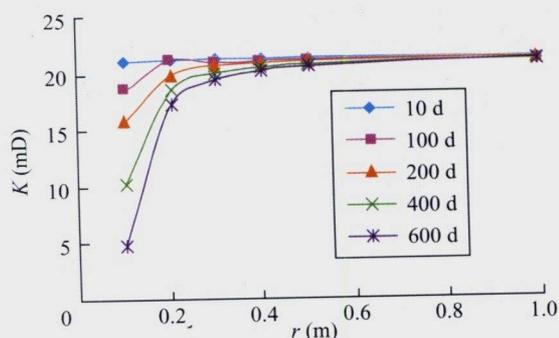


图4 气体渗流过程中渗透率沿径向分布曲线

根据以上分析,元素硫沉积对储集层的伤害集中在近井带附近一个相对较小的区域,这对采用适当的方法和措施清除沉积到地层中的元素硫是有利的。但是元素硫在地层中的沉积对储集层的伤害程度随着生产时间的增长而加速变化(以渗透率下降为例,在生产期的3个200d内,其下降率分别为3.42%、9.01%和18.16%),这就要求开采过程中的防护措施及时得当。

3 结论

元素硫沉积对储集层的伤害集中在近井带附近一个相对较小的区域,且离井筒越近,储集层伤害程度越严重,孔隙度和渗透率下降越大,反之则越小,从而使孔隙度和渗透率沿径向的分布呈漏斗形状。元素硫沉积于地层中对储集层的伤害程度随着生产时间的增长而逐渐加剧。因此在开发高含硫气藏的过程中,对元素硫在地层中的沉积应尽量早预防、早发现、早治理,从而达到提高采出程度的目的。

符号注释:

V_s ——元素硫体积量, m^3 ; C ——元素硫的溶解度, g/m^3 ; ρ_s ——元素硫的密度, $2.07g/cm^3$; q ——气体产量, $10^4 m^3/d$; B_g ——气体体积系数; μ_g ——气体黏度, $mPa \cdot s$; t ——生产时间, d ; V_m ——岩石体积, m^3 ; ϕ, ϕ_0 ——孔隙度、初始孔隙度, %; K, K_0 ——有效渗透率、初始渗透率, mD ; h ——储集层有效厚度, m ; r ——地层中一点距井中心距离, m ; S_s ——地层含硫饱和度, %; v ——气体流速, m/d ; τ ——延迟时间, d ; ρ_g ——天然气密度, g/cm^3 ; R_w ——井筒半径, m ; p ——地层压力, MPa ; β ——非达西流动系数。

参考文献:

- [1] 杨川东. 采气工程[M]. 北京:石油工业出版社,2001.(YANG Chuan-dong. Natural gas production engineering [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.)
- [2] Al-Awadhy F, Kocabas I, Abou-Kassem J H. Experimental and numerical modeling of sulfur plugging in carbonate oil reservoirs [A]. SPE 49498,1998.
- [3] Abou-Kassem J H. Experimental and numerical modeling of sulfur plugging in carbonate reservoirs[J]. JPSE,2000,26:91-103.
- [4] Shedid A S, Zekri A Y. Formation damage due to sulfur deposition in porous media[A]. SPE 73721,2002.
- [5] Khasanov M M, Bulgakova G T. Mathematical modeling of non equilibrium and no-linear effects in two-phase fluid filtration[A]. Extended abstracts book of the 6th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery[C]. Scotland: European Association of Geoscientists & Engineers,1998.8-11.
- [6] Bruce E. The effect of sulfur deposition on gas well inflow performance[A].SPE 36707,1998.

第一作者简介:曾平(1978-),男,四川南充人,西南石油学院博士研究生,主要从事油气田开发研究工作。地址:四川省成都市新都区,西南石油学院研究生院博士2003级,邮政编码:610500,电话:(028)83030440。E-mail:zengppy@tom.com

收稿日期:2005-06-17

(编辑 王华 绘图 李秀贤)

Formation damage from elemental sulfur deposition in sour gas reservoir

ZENG Ping¹, ZHAO Jin-zhou¹, ZHOU Hong-bin² (1. Southwest Petroleum Institute, Sichuan 610500, China; 2. Huanghe Drilling Company, SLOF, Sinopec, Shandong 257064, China)

Abstract: Reservoir pressure and temperature decrease radially to the borehole after the gas wells were put into production. Elemental sulfur is separated from gas stream and precipitate in the pores or channels if the gas stream is saturated with sulfur, which decreases the porosity and permeability or even completely plugs the flow channels of gas and leads to the closed in or abandonment of the gas wells. The paper presents a model to simulate the formation damage caused by elemental sulfur deposition, based on which the characteristics of elemental sulfur deposition and its damage to the formation properties were analyzed. The results show that the elemental sulfur mainly deposits in the near wellbore area and the deposition decreases radially from the wellbore to the formation. Formation damage is more serious in the area nearer to the wellbore and the damage increases with the production.

Key words: sour gas reservoir; elemental sulfur; deposition; plug; damage