

CO₂ 压裂后近缝带烃类的相态特征^{*}

位云生¹ 胡永全² 张啸枫¹ 阮刚³ 贾成业³

(1. 中国石油勘探开发研究院鄂尔多斯分院 2. 西南石油大学 3. 中国石油大港油田公司)

位云生等. CO₂ 压裂后近缝带烃类的相态特征. 天然气工业, 2008, 28(11): 91-92.

摘要 CO₂ 压裂与常规水力压裂相比, 除具有滤失小、易返排、低伤害等常规优点外, 还能降低烃类的露点压力, 对易凝析的中间组分产生很强的抽提作用, 有效解除了由于温度压力的变化所造成的近缝带凝析油污染。这为提高凝析气藏采收率、制定合理有效的开发手段提供了新的途径。以中原油田白庙凝析气田为例, 建立了数值计算模型, 研究了 CO₂ 压裂停泵时刻其 CO₂ 量不同的凝析气藏近缝带烃类的相态变化及各点凝析油饱和度的变化情况。研究表明: CO₂ 气体对凝析气藏烃类的相态影响是 CO₂ 压裂优于常规水力压裂的重要原因, 且 CO₂ 量不同时对烃类相态的影响程度存在显著差异。这为现场实际结果的解释及优化凝析气藏 CO₂ 压裂的气体用量和压裂规模提供了理论依据。

关键词 二氧化碳 凝析油气田 裂缝(岩石) 相态 饱和度 白庙气田

CO₂ 压裂除具有 CO₂ 滤失小、易返排、低伤害等常规优点外^[1-2], 还能降低烃类的露点压力, 对易凝析的中间组分产生很强的抽提作用, 有效地解除凝析油污染, 为凝析气藏的合理有效开发探索了新的途径。

一、理论基础

CO₂ 压裂中的 CO₂ 在地面条件下是液态的, 液态 CO₂ 在被注入的过程中不断吸收井筒和地层热量, 在某一位置气化。因此, 与压力变化的影响相比, CO₂ 压裂对近井带和近缝带温度的影响占主导。这和常规压裂是不同的。CO₂ 气体进入人工裂缝后, 与近缝带周围的烃类迅速混合。假设 CO₂ 气体与烃类气体完全混相, 且地层均质、各向同性, 流体作二维流动。根据假设条件, 建立温度压力场的数值计算模型^[3], 差分迭代求得压裂停泵时的井底压力和温度、压裂液的波及范围及该范围内各点的温度压力分布, 其计算结果直接在实例分析中给出。CO₂ 气体与地层烃类气体完全混相后, 对烃类相态及凝析油饱和度产生影响。以相态理论为基础, 建立相平衡计算模型^[4], 推导出饱和度计算公式。

相平衡公式: $F = \rho S_o + \rho_g S_g$

油气相的物质平衡方程组: $Z_i = Lx_i + Vy_i$

$$\text{其中: } L = \frac{\rho S_o}{\rho S_o + \rho_g S_g} = \frac{\rho S_o}{F}$$

$$V = \frac{\rho_g S_g}{\rho S_o + \rho_g S_g} = \frac{\rho_g S_g}{F}$$

在压力 p_o 下可计算出逸度 f_i^L 、 f_i^V 和气、液相摩尔密度。由以上公式可得简单的饱和度计算式:

$$S_o = \frac{\rho \rho_g (1 - V) - L \rho_g^2}{V \rho^2 - L \rho_g^2 - \rho \rho_g (L - V)}$$

$$S_g = 1 - S_o$$

二、应用算法

笔者采用 Newton-Raphson 算法来求解上述非线性方程组, 其计算精度较高^[5]。逸度方程和相组分约束方程以误差方程的形式可写成:

$$R_i = y_i \phi_i^V - x_i \phi_i^L \quad R_{N_c+1} = 1 - \sum_{i=1}^{N_c} x_i = 0$$

将上述 $N_c + 1$ 个变量差分化, 并根据组成守恒方程, 有

$$\frac{\partial R_i}{\partial x_j} = \frac{L}{L-1} \left(\frac{\partial y_i}{\partial y_j} \phi_i^L + y_i \frac{\partial \phi_i^L}{\partial y_j} \right) - \left(\frac{\partial x_i}{\partial x_j} \phi_i^L + x_i \frac{\partial \phi_i^L}{\partial x_j} \right)$$

$$\frac{\partial R_{N_c+1}}{\partial L} = 0 \quad \frac{\partial R_{N_c+1}}{\partial x_j} = -1$$

$$\frac{\partial R_i}{\partial L} = \frac{L}{L-1} \sum_{j=1}^{N_c} (x_j - y_j) \left(\frac{\partial y_i}{\partial y_j} \phi_i^L + y_i \frac{\partial \phi_i^L}{\partial y_j} \right)$$

* 本文受到四川省天然气开采重点实验室项目“凝析气藏压裂优化设计”(编号: GPL04-09)的资助。

作者简介: 位云生, 1979年生, 博士研究生; 主要从事油田开发决策及支持技术研究工作。地址: (100083)北京市海淀区学院路20号。电话: (010)62093217。E-mail: weiyunsheng_1999@163.com

进行消元、迭代即可求出 x_i 、 y_i 、 V 、 L ，继而求得 S_o 和 S_g 。

三、实例分析

选中原油田白庙凝析气田的1口井,目的层深度为3 500 m,原始地层温度、压力分别为 135 °C、36.28 MPa;水力裂缝半长为 287 m,裂缝宽度为 1.63 cm,裂缝高度为 19 m,停泵时刻井底温度、压力分别为 36.1 °C、41.5 MPa,压裂液波及的最大深度为 0.604 m。其拟组分的原始摩尔含量和 CO₂ 量增加时的拟组分的摩尔含量见表1。根据表1中拟

表1 CO₂ 量不同时的拟组分摩尔含量表

拟组分	原始摩尔含量 (%)	不同 CO ₂ 量时的摩尔含量 (%)					
CO ₂	2.13	9.27	23.47	33.82	41.71	47.91	
C ₁	86.10	79.84	67.35	58.24	51.30	45.84	
C ₂	5.81	5.38	4.54	3.93	3.46	3.09	
C ₃	2.13	1.97	1.66	1.44	1.27	1.13	
C _{4~6}	1.98	1.81	1.53	1.32	1.16	1.04	
C ₇₊	1.86	1.72	1.46	1.26	1.10	0.99	

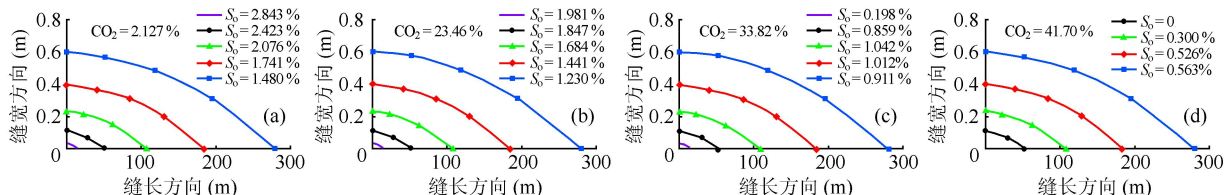


图2 不同 CO₂ 含量下凝析油饱和度在压裂液波及区内的分布图

四、结论与认识

(1)CO₂ 可降低地层中的凝析油饱和度,有利于改善地层情况。

(2)随着 CO₂ 气体所占研究区域内摩尔百分含量的增加,近缝带的凝析油饱和度是降低的,且最大凝析油饱和度的位置从井底逐渐向地层推移。其原因也是温度压力不同时,CO₂ 对中间组分和重组分抽提能力不同的缘故。

符号说明

L 为液相总摩尔分数; V 为气相总摩尔分数; N_c 为组分数; Z_i 为烃类混合物中 i 组分摩尔组成; x_i 为液相中 i 组分的摩尔组成; y_i 为气相中 i 组分的摩尔组成; ϕ^g 、 ϕ^l 分别为组分 i 中气、液相的逸度系数; K_i 为组分 i 的平衡常数,初值由 Wilson 公式计算; ρ_o 为油相摩尔密度; ρ_g 为气相摩尔密度; R_i 为余项, $i=1,2,\dots,N_c+1$; S_o 为含油饱和度; S_g 为含气饱和度; x_j 为液相中 j 组分的摩尔组成; y_j 为气相中 j 组分的摩尔组成。

组分的摩尔含量,可计算出各压力温度下 CO₂ 摩尔含量不同时的凝析油饱和度(见图1)。

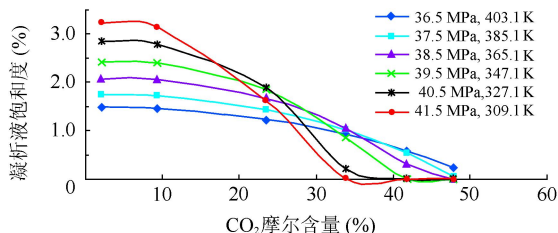


图1 不同温度压力下凝析油饱和度与 CO₂ 摩尔含量关系图

从图1可以看出:CO₂ 压裂凝析气藏是可行的,它对 C_{2~6}、C₇₊ 有很强的抽提能力。如果控制地面 CO₂ 注入温度,使进入地层的 CO₂ 温度略高于其临界温度(304 K),CO₂ 的抽提作用会更佳,解除凝析油污染的能力就更强。

根据裂缝周围的温度和压力分布,由相态计算模型和饱和度计算公式,计算出 CO₂ 摩尔百分含量不同情况下各点的凝析油饱和度值,并绘制出等饱和度线在平面位置上的分布图(图2)。图中相邻两曲线间的温度差为 20 °C,压力差为 1 MPa。

参考文献

- [1] CAMPBELL S M, FAIRCHILD N R, ARNOLD D L. Liquid CO₂ and sand stimulations in the lewis shale, San Juan Basin, New Mexico; A case study[C]. Denver, Colorado; SPE, 2000.
- [2] GUPTA D V S. Field application of unconventional foam technology; extension of liquid CO₂ technology[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado; SPE, 2003.
- [3] 位云生,胡永全,赵金洲,等.井筒与地层非稳态换热数值计算方法[J].天然气工业,2005,25(11):66-68.
- [4] LITVAK M L, WANG C H. Simplified phase-equilibrium calculations in integrated reservoir and surface-pipeline-network models[J]. SPE Journal, 2000, 5(2):236-241.
- [5] 何伟,孙雷.牛顿-拉夫森算法在相平衡计算中的应用研究[J].石油勘探与开发,1999,26(4):68-71.

(修改回稿日期 2008-07-22 编辑 韩晓渝)