

压裂凝析气井产能影响因素模拟分析

朱炬辉 胡永全 赵金洲 吴宏波

(西南石油学院)

朱炬辉等.压裂凝析气井产能影响因素模拟分析.天然气工业,2005;25(5):91~93

摘要 凝析油气藏与常规油气藏的重要区别在于其生产过程的相态变化特性,富含凝析油的重组分的凝析量远远大于轻组分,压裂后在裂缝周围地带也会产生凝析油的析出现象。文章应用油气相的渗流模型,结合相平衡、初始条件和定压边界条件,以简化的组分模型为基础,使用 IMPES 数值计算得到了预测凝析油气藏压裂前后生产动态的数值计算方法,并以东濮凹陷 QK 气田某生产井为例给出了压裂后凝析液、天然气产能变化规律。最后,结合组分、裂缝长度变化,综合分析了引起产能变化的原因。

主题词 凝析气井 水力压裂 生产 动态 组分 数学模拟

凝析油气藏与常规气藏的主要差别体现在:①在等温降压过程中有液相析出;②继续降压则回反转气化,凝析开始低于露点压力;③凝析油气藏开采过程中液相与气相同时存在。所以在凝析油气藏的压裂过程中,随着地层 p 、 T 状态的变化,气相中的重烃会发生相间传质、相态变化影响凝析油气藏的渗流,形成气液两相未饱和流动,相态变化使研究与认识凝析油气藏的更加复杂化。因此,不可能直接采用气藏或黑油油藏的计算方法预测凝析油气藏压裂后的气液生产动态。

笔者应用简化的组分模型,把凝析油气藏看作各烃类化合物的混合物,采用数值方法预测凝析油气藏压裂后的气液生产动态。并以 QK 某生产井为例,给出了模拟结果。

一、数学模型

建立数学模型之前,假设:①储层内油气相流动均服从达西定律;②组成油气烃类的各组分在渗流过程中会发生相间传质及相态变化,但平衡是在瞬间完成;③油气体系存在 N_c 个组分;④考虑岩石的压缩性和渗透率的各向异性;⑤渗流是等温过程。

第 i 组分和总烃的流动方程如下:

$$\nabla \cdot [\lambda_o \rho \nabla \phi] + \nabla \cdot [\lambda_g \rho_g \nabla \phi_g] + q_i = \frac{\partial}{\partial t} (\phi F z_i) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [\lambda_o \rho \nabla \phi] + \nabla \cdot [\lambda_g \rho_g \nabla \phi_g] + q_h = \frac{\partial}{\partial t} (\phi F) \quad (2)$$

$$F = \rho_o S_o + \rho_g S_g$$

$$q_h = \sum_{i=1}^{N_c} q_i$$

$$\rho_g = \frac{p_g}{Z_g R T}$$

式中: z_i 为组分 i 在烃类系统中的总摩尔分数; N_c 为组分数; ϕ 为孔隙度; ρ 为摩尔密度; λ 流体流度; ϕ 为流体势(对气相忽略重力势); T 为绝对温度; R 为通用气体常数; Z_g 为气体压缩因子; 下标 o 、 g 分别表示油、气相; 方程中总烃产量注入为正, 产出为负。

结合热力学平衡条件、油气相的物质平衡和由摩尔分数和饱和度的定义的约束方程, 在定压外边界和定井底压力工作制度求解。

二、数值计算分析

采用 IMPES 方法(即隐式压力显式饱和度方法)求数值解。当井底流压高于上露点压力时, 整个凝析油气藏不会出现反凝析现象, 也不会井壁周围出现凝析液, 整个凝析油气藏只产生凝析气, 不出凝析油, 气体采收率较高, 和单纯气藏的产能完全相同。为了计算的准确性, 当井底流压低于上露点压力时, 将凝析气井分为 3 个区域进行计算, 划分及其

* 本文为四川省“天然气开采实验室”开放基金项目(编号: GPL04-09)。

作者简介: 朱炬辉, 在读博士研究生; 现从事凝析油气藏压裂增产技术等方面的研究。地址(610500)四川省成都市新都区西南石油学院博 2004 级。电话: (028)83030425。E-mail: zhujuhuf@etang.com。

特征如下。

区域1:在井壁附近区域,发生较强的反凝析现象,大量的凝析油积聚在多孔介质中,且凝析油饱和度大于临界凝析油饱和度,天然气和凝析油以不同速度流动。该区域流体组分保持不变,进入该区域的天然气和井流物组成相同;该区域是气体产能损失的主要源泉;该区域尺寸随着衰竭时间增大而增大。

区域2:在井壁附近区域较远处,凝析油积聚在多孔介质中,但凝析油饱和度小于临界凝析油饱和度,凝析油不流动,仅天然气流动。凝析油饱和度约为等容衰竭实验液体出流曲线。该区域尺寸在地层压力降到露点压力以下早期时候尺寸较大,之后逐渐减小。

区域3:在井壁附近区域最远处,仅原始凝析油气藏天然气流动。地层压力高于上露点压力,无反凝析现象产生。天然气组分为原始气藏组分,可以作为单相气体处理。

三个区域的产能计算各有不同,区域1和2的产能公式中拟压力部分包含气体和凝析油两相流饱和度和相对渗透率;区域3的产能公式中拟压力和单相干气的拟压力公式完全相同。另外,拟压力随着时间变化是逐渐变化的,在此在时间步长较小的范围内假设拟压力保持在此时间区间保持不变。

1. 三个区域的拟压力迭带

$$\text{区域1: } m(p)|_1 = 2 \int_{p_a}^{p_{wf}} \left(\frac{K_{ro}}{\mu_b Z_o} + \frac{K_{rg}}{\mu_k Z_g} \right) p dp \quad (3)$$

$$\text{区域2: } m(p)|_2 = 2 \int_{p_d}^{p_f} \left(\frac{K_{rg}}{\mu_k Z_g} \right) p dp \quad (4)$$

$$\text{区域3: } m(p)|_3 = 2 K_{rg} (S_{wi}) \int_{p_e}^{p_d} \frac{1}{\mu_k Z_g} p dp \quad (5)$$

式中: p_e 为外边界压力; p_d 为露点压力; p_a 为1、2边界压力; p_{wf} 为井底流压。

2. 物质平衡公式

$$\text{区域1: } \frac{p}{Z} = \frac{p_i}{Z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \quad (6)$$

$$\text{区域2: } \frac{p}{Z_2} = \frac{p_i}{Z_{2i}} \left[1 - \frac{G_p (1 + R_{MLGP})}{G (1 + R_{MLGi})} \right] \quad (7)$$

式中: Z_2 为两相压缩因子; R_{MLGP} 为摩尔凝析油/天然气。

当初始压力大于露点压力,则 p/Z_2 为显式线性方程;当初始压力小于露点压力,则 R_{MLG} 为 p/Z_2 的函数,须通过迭代求解。

当凝析油气藏进行水力压裂后,同样在裂缝中也会形成完全相同的3个区域,计算方法也相似。

3. 网格剖分

凝析油气藏中气液两相物性参数是时间和空间的函数,边界条件的划分的时候也要分3个区域分别进行计算,也具有一定的复杂性,用解析法难以求解,笔者采用有限差分的数值方法进行求解。

在井筒至一、二区域之间由于裂缝附近和井筒附近压降较大,在此范围内应当加密网格。

在第二区域内,气液两相同时存在,并且在二、三区域的分界处恰是达到露点压力的时候,所以在此区域也应当加密网格。

第三区域可以适当减少网格。

在压裂井产量在生产初期递减较快,故初期步长应当取小些,以后逐渐加大。

三、示例计算模拟

将问题简化为只考虑两种组成成分的流体混合物,即甲烷和戊烷。公式脚则全组分模型简化为 $i=1,2$ 的各个方程组。

1. 数据1

假设凝析油气藏温度为348 K,井深2000 m,凝析油气藏厚度20 m。孔隙度为5%,压力系数为1,渗透率为 $0.001 \mu\text{m}^2$,井底流动压力为15 MPa,边界压力为30 MPa。

从计算结果可以看出,压裂对气产量改善明显,对凝析油产量增加相对不明显。并且,压裂可能使凝析油提前析出并流动。

在其他条件不变的情况下,改变组分数进行模拟计算可以得到组分数对气液产量影响情况。可以看出,随着重组分百分比的增加,天然气产量逐渐降低。

组分数一定时,天然气和凝析液的产量随着裂缝变化动态分别参见图1-a、b。可以看出,凝析液和天然气产量随着裂缝长度的增加都是增加的。由于凝析油气藏开采过程中,开始生产时重组分析出量较少不足以达到流动条件,因而产液量较少,但该段时间很短。然后,随着生产时间逐渐增加,油藏压力逐渐降低,重组分逐渐开始析出且析出的凝析液量逐渐增加,液相饱和度随之增加,满足液相流动条件后(即临界凝析油饱和度)开始产液,产液量急剧增加直到达到最大值,这期间凝析液产量增加较快,而天然气产量下降较快。随后凝析液和天然气产量逐渐减小。

当裂缝长度一定的时候,比较不同组分条件下,天然气的产量变化参见图1-c。从图中可以看出,

当裂缝长度和其他参数一定的情况下,重组分含量增加,将导致天然气产量的降低。因为,重组分含量的增加直接导致凝析油析出量的增加;相反的,如果轻组分含量的增加则直接影响凝析出现的时间延缓,凝析量的减少。则天然气产量增加。

2. 数据 2

QK 构造某深层凝析气井的主要计算参数如下：

C₁ 为 87.543% ,C₂ 为 5.633% ,C₃ 为 1.655% ,C₅~C₁₁ 为 5.169% ;油藏埋深 4300 m,产层厚度 20 m,地层温度 427 K,地层压力 51.6 MPa,地层渗透率 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度 9%,水力裂缝半长 135 m,裂缝导流能力 $18 \mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$,井底流压 17 MPa。计算结果见图 2,可以看出凝析气井经压裂后,天然气和凝析油的产量均增加。

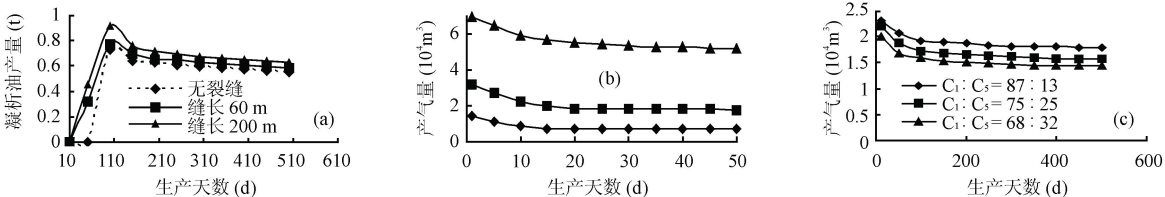


图 1 裂缝长度对凝析油产能、天然气产量的影响及组分变化对天然气产量的影响

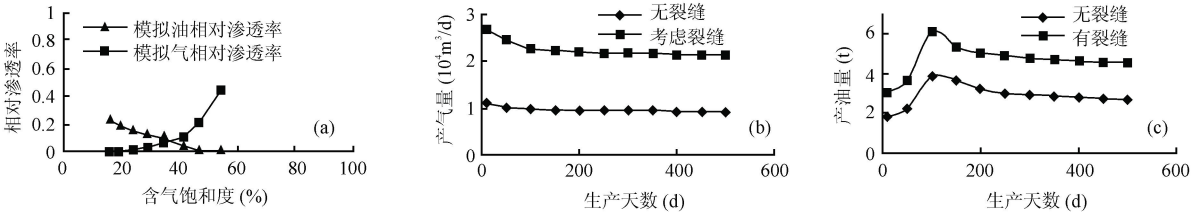


图 2 QK 某凝析气井相对渗透率数据及压裂对天然气、凝析油产量增产示意图

五、结论与认识

(1)首次描述平衡气液相组成、物质质量(摩尔数)及平衡常数与压力、温度关系的物质平衡条件方程组,并结合组分模型建立了凝析油气藏压裂后生产动态模拟的数学模型和数值计算模型,计算可靠,可以用于预测凝析油气藏压裂后生产动态。

(2)随着裂缝长度的增加,天然气和凝析液的产量均增加,裂缝越长,增产越明显,这与常规气藏、黑油油藏压裂增产相似。地层混合物中重烃组分含量越大,凝析现象也将更为明显,凝析现象对生产的影响将更大。因此,凝析油气藏压裂增产效果不仅取决于压裂裂缝几何尺寸,而且受储层流体组成的显著影响。

(3)凝析油气藏压裂与常规气藏、黑油油藏压裂在产能计算中使用的模型不同。产能计算是分为三个随时间变化的动态区域计算的。在近井和裂缝周围可能有大量的凝析液析出并饱和地层而产生凝析油环,对储层产生很大的伤害,极大地减小天然气产量。这些凝析油环受到储层流体组成、储层的温度

压力条件和压裂后工作制度多种因素控制,严重时可能完全液堵,不能产气而只有少量凝析油。

参 考 文 献

- 1 朱炬辉,胡永全等.井筒周围凝析油析出动态分析.天然气勘探与开发,2004;(2)
- 2 Fevang E,Whitson C H.Three phase flowing dynamic analysis in gas condensate reservoirs.SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas,1995
- 3 Henderson G D et al.Effect of inertial and positive rate sensitively on measured gas condensate relative permeability at high velocity .Paper to be presented at 10th European Symposium on IOR,1999
- 4 Sumnu M D et al.An analysis of gas condensate flow through porous media.JPT,1997
- 5 胡永全,朱炬辉,赵金洲等.流体组成对凝析油气藏产能的影响.断块油气藏,2004;(9)
- 6 赵金洲,胡永全,朱炬辉.凝析油气藏压裂产能模拟研究.天然气工业,2004;(10)

(收稿日期 2005-03-07 编辑 韩晓渝)