

塔中 I 号碳酸盐岩凝析气藏单井产能变化规律^{*}李勇¹ 李保柱¹ 胡永乐¹ 夏静¹ 丁伟²

(1. 中国石油勘探开发研究院油气田开发所 2. 中油国际海外研究中心)

李勇等. 塔中 I 号碳酸盐岩凝析气藏单井产能变化规律. 天然气工业, 2008, 28(10): 87-89.

摘要 随着塔里木盆地塔中 I 号碳酸盐岩凝析气田投入开发, 迫切需要开展碳酸盐岩凝析气藏的单井产能变化规律方面的研究, 从而指导气田的开发。通过建立双重介质单井径向模型, 研究了初始生产气油比、地层渗透率、地层压力降落速度及形状因子对产能变化规律的影响。结果表明, 当地层压力高于露点压力, 产能基本不变化; 当地层压力低于露点压力后, 井产能会迅速降低, 当地层压力为露点压力的 95% 时, 即使很小的反凝析液量也会导致产能大幅度降低了 50% 以上; 初始生产气油比、地层渗透率、地层压力降落速度对产能变化规律影响比较敏感, 形状因子则不敏感。

关键词 塔里木油田 碳酸盐岩 凝析油气田 生产能力 反凝析

影响凝析气井产能的因素包括近井地带的非达西流动现象、机械表皮系数和高速气流下引起的毛细管效应带走的部分凝析油等^[1]。对于凝析气藏, 很低的凝析油饱和度也会使气相渗透率急剧降低。例如 Arun 凝析气藏^[2], 在近井区最大反凝析液量不过 1%, 但是当压力下降到露点压力以下时, 产能下降了近一半。对普通砂岩凝析气藏的产能变化规律, 国外研究较为深入^[3-7], 而对碳酸盐岩凝析气藏单井产能变化规律研究相对较少, 主要还是借鉴研究砂岩凝析气藏的方法。塔中 I 号气田的开发, 迫切需要开展碳酸盐岩凝析气藏单井产能变化规律的研究, 笔者通过建立精细网格的组分双重介质数值模型来模拟碳酸盐岩凝析气藏单井产能的变化规律。

一、模型定义

模型网格为 25(X 方向)×10(Y 方向)×2(Z 方

向)=500 个, 这里 Z 方向网格划分为 2 层分别代表岩块系统和裂缝系统 Z 方向的网格, 井位于网格中心, 径向网格由井底向外部依对数函数变化逐渐变大。最内部网格尺寸为 0.36 m, 最外部网格尺寸为 340 m。岩块系统网格厚度为 30 m, 孔隙度为 0.1; 裂缝系统网格厚度为 10 m, 孔隙度为 0.01。所有模型外边界统一为 1 300 m。为了减少三相流的复杂性, 模型没有加入水体, 所有模型初始气藏压力略高于露点压力。建立的模型岩块系统渗透率分别为 1×10^{-3} 、 5×10^{-3} 、 10×10^{-3} 、 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 裂缝系统渗透率分别对应为 100×10^{-3} 、 500×10^{-3} 、 $1\ 000 \times 10^{-3}$ 、 $5\ 000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 不同的初始生产气油比为 2 555、4 311、5 900 m^3/m^3 ; 不同的初始日产气量为 5×10^4 、 10×10^4 、 15×10^4 、 $20 \times 10^4 \text{m}^3$ 。表 1 为模型中采用的 3 口井的井流物组成及部分属性值。

另外, 定义 $PI = Q_g / (p_r - p_{wf})$ 为任意时刻井

表 1 模型采用井的井流物组成及部分属性值表

井号	组 分 (mol%)													CVD 实验最大反凝析液量 (%)	气油比 (m^3/m^3)
	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅	nC ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁ ⁺		
1 号	86.34	1.42	0.56	0.21	0.36	0.23	0.25	0.50	0.58	0.65	0.43	0.34	1.58	12.51	2 555
2 号	88.42	2.21	0.72	0.20	0.35	0.15	0.17	0.25	0.21	0.33	0.29	0.27	1.36	8.34	4 311
3 号	93.84	0.91	0.19	0.03	0.07	0.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.09	0.09	0.64	1.14	5 900

^{*} 本文为国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号:2001CB209100)的部分成果。

作者简介: 李勇, 1982 年生, 博士研究生, 现从事碳酸盐岩油藏数值模拟研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 20 号。电话: (010) 62098037。E-mail: liyongph@gmail.com

的产能公式。式中： PI 为井产能， $m^3/(d \cdot MPa)$ ； Q_g 为井日产气量， m^3/d ； p_r 为目前地层压力， MPa ； p_{wf} 为井底流压， MPa 。为了对比起见，定义产能比是地层压力为 p_r 时的产能与地层压力为原始地层压力时的产能之比。

二、产能变化规律

1. 初始生产气油比对产能的影响

对碳酸盐岩凝析气藏来说，初始生产气油比越大，该井最大反凝析液量则较低(表1)。图1所示为不同初始生产气油比模型单井产能比随油藏压力与露点压力比值(p_r/p_D)变化关系曲线，初始油藏压力略高于露点压力，即 p_r/p_D 的值略大于1。由图1可见，当 $p_r/p_D > 1$ 时，产能基本未发生变化；当其他条件相同，井初始气油比越小，最大反凝析液量越大，则井产能降低幅度越大；对3号井来说，初始生产气油比为 $5\,900\,m^3/m^3$ ，即使CVD实验最大反凝析液量只有1.14%，当压力低于露点压力以后，产能相比也降低了50%，降低幅度也较大，与文献[2]的Arun凝析气田相似；当压力为露点压力的95%时，产能便已迅速降低到初始的50%以下，之后产能变化不大，甚至在多种因素综合作用下有上升趋势；初始生产气油比为 $4\,311\,m^3/m^3$ 和 $2\,555\,m^3/m^3$ 对产能的影响差别不大，与 $5\,900\,m^3/m^3$ 时的差别较大。

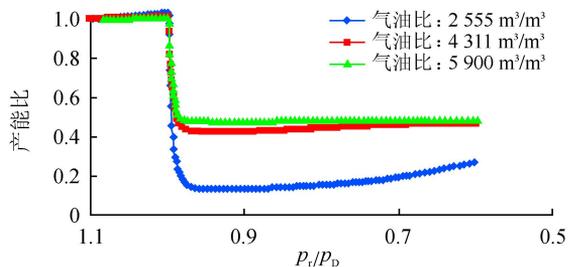


图1 不同初始生产气油比模型产能变化规律对比图

通过1号井模拟最终时刻裂缝与岩块系统的参数分布来看，井底附近岩块系统含油饱和度较高，导致气相相对渗透率明显降低；井底裂缝系统含油饱和度相比岩块来说要低得多，且由于其相渗曲线采用对角线直线关系，渗透率变化不大。由此可以看出，对于碳酸盐岩凝析气藏来说，当压力低于露点压力后产能降低主要是由于岩块系统的气相相对渗透率降低引起的。

2. 渗透率对产能的影响

由于碳酸盐岩凝析气藏的高度非均质性，渗透率对产能的影响更加复杂。采用2号井的PVT数

据，建立了4个模型，裂缝渗透率与岩块渗透率的比值为100:1，4个模型岩块的渗透率分别为 1×10^{-3} 、 5×10^{-3} 、 10×10^{-3} 、 $50 \times 10^{-3} \mu m^2$ ，其他参数不变。图2所示为4个不同渗透率模型产能变化规律的对比曲线，其中 K_m 代表岩块系统渗透率， K_f 代表裂缝系统渗透率。由结果可以看出，岩块系统和裂缝系统渗透率越低，产能降低幅度越大；当岩块系统和裂缝系统渗透率逐渐增大，反凝析导致产能降低幅度相差不大。

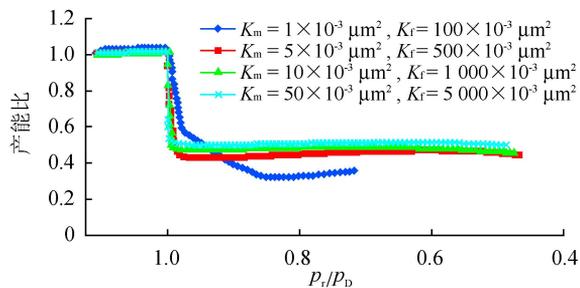


图2 不同渗透率模型产能变化规律对比图

另外还可以看出，当压力刚刚低于露点压力时， $K_m = 1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 的模型即渗透率最低的模型的产能降低幅度却较渗透率较高的模型小，当 $p_r/p_D < 0.9$ 后，才符合模型渗透率越低、产能降低幅度越低的规律。为此，对比了4个模型当 $p_r/p_D = 0.957$ 时岩块最大含油饱和度、裂缝含油饱和度及模拟最终时刻岩块最大含油饱和度、裂缝含油饱和度，其结果见表2。这里之所以对比最大含油饱和度，是因为该值可以反映井底反凝析液聚集的情况，并且通过该值可以看出反凝析对气相相对渗透率影响的大小。由表2可以看出，当 $p_r/p_D = 0.957$ 时，模型 $K_m = 1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 的岩块最大含油饱和度要低于其他3个模型，裂缝最大含油饱和度要大于其他3个模型。这是因为生产初期，主要是裂缝向井供液，岩块系统渗透率越低，初期裂缝的作用越明显，而反凝析对裂缝系统的影响较小，从而当地层压力低于露点压力的初期模型 $K_m = 1 \times 10^{-3} \mu m^2$ 的产能降低幅度相比较较低；而最终时刻该模型的岩块系统和裂缝系统的最大含油饱和度均大于其他3个模型，即该模型井底附近气相相对渗透率降低幅度最大，从而导致产能降低幅度最大。

3. 地层压力降落速度对产能的影响

基于2号井的PVT数据，建立了4个不同日产气量的模型，对比分析不同地层压力降落速度对产能的影响。4个模型的日产气量分别为 5×10^4 、 10×10^4 、 15×10^4 、 $20 \times 10^4\,m^3$ ，其对比结果见图3。

表 2 不同渗透率模型不同时刻饱和度情况表

渗透率模型 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	$p_r/p_D=0.957$ 时岩块 最大含油饱和度 (%)	$p_r/p_D=0.957$ 时裂缝 最大含油饱和度 (%)	最终时刻岩块最大 含油饱和度 (%)	最终时刻裂缝最大 含油饱和度 (%)
$K_m=1, K_f=100$	0.292 90	0.430 74	0.555 36	0.500 79
$K_m=5, K_f=500$	0.477 71	0.313 55	0.465 46	0.134 12
$K_m=10, K_f=1\ 000$	0.438 11	0.179 50	0.437 44	0.069 96
$K_m=50, K_f=5\ 000$	0.376 48	0.032 90	0.378 62	0.012 65

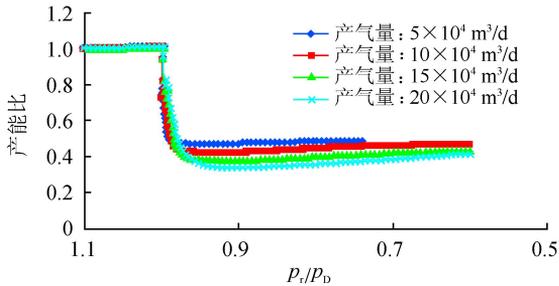


图 3 不同地层压力降落速度模型产能变化规律对比图

由图 3 可以看出,日产气量越大,即地层压力降落速度越快,产能相比初期降低幅度越大。

4. 形状因子对产能的影响

双重介质油气藏中有一个重要参数——形状因子(σ),它反应了流体从基质岩块系统流入裂缝系统的难易程度,其值越大说明流体越容易从岩块流入到裂缝系统。定义为: $\sigma=4\left(\frac{1}{L_x}+\frac{1}{L_y}+\frac{1}{L_z}\right)^2$,单位是 m^{-2} , L_x, L_y, L_z 是岩块在 3 个方向的尺寸, m 。图 4 为 σ 分别为 0.12、0.06、0.012 m^{-2} 时的产能变化规律对比曲线,可以看出形状因子越大,产能降低幅度相对较低,形状因子对产能的变化影响很小。

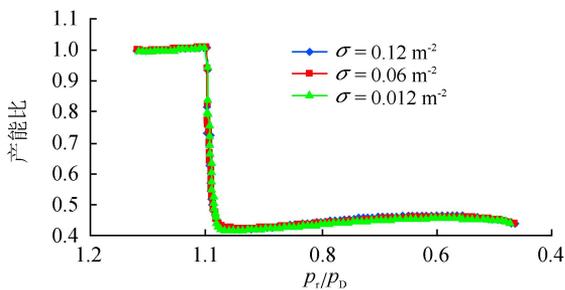


图 4 不同 σ 值模型产能变化规律对比图

三、结 论

经过以上分析可以看出,对于碳酸盐岩凝析气藏来说,反凝析对产能的影响较大。总体来看,产能的变化有以下几条规律:

(1)当地层压力高于露点压力时,产能基本未发

生变化;地层压力低于露点压力以后,产能迅速降低,之后变化平稳或略有上升趋势。

(2)当地层压力低于露点压力以后,即使 CVD 实验最大反凝析液量只有 1% 左右,产能较初期最大降低达到 50% 以上。

(3)同样条件下,气油比越大(即 CVD 实验最大反凝析液量越大),岩块和裂缝系统渗透率越低,日产气量越大(即地层压力降落速度越大),形状因子越小,产能降低幅度越大;形状因子对产能的影响很小。

参 考 文 献

- [1] 刘建仪,郭平,李士伦,等.反凝析污染对凝析气井伤害的实验评价研究[J].天然气工业,2001,21(5):67-70.
- [2] MOTT R E, CABLE A S, SPEARING M C. Measurements of relative permeability for calculating gas-condensate well deliverability [J].SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(6):473-479.
- [3] DU Y, GUAN L, LI D. Deliverability of wells in the gas condensate reservoir [J]. Abu Dhabi International Conference and Exhibition, 2004, 5(2):153-159.
- [4] WHITSON C H. Modeling gas- condensate well deliverability [J]. SPE Reservoir Engineering, 1996, 11(4):221-230.
- [5] MOURAD BENGHERBIA, DJEBBAR TIAB. Gas-condensate well performance using compositional simulator: a case study [C]. SPE Gas Technology Symposium. Calgary, Alberta, Canada; SPE, 2002.
- [6] AYYALASOMAJAJULA P, SILPNGARMLERS N, KAMATH J. Well deliverability predictions for a low-permeability gas/condensate reservoir [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas; SPE, 2005.
- [7] ALI J K, MCGAULEY P J, WILSON C J, et al. Experimental studies and modelling of gas condensate flow near the wellbore [C]. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Rio de Janeiro, Brazil; SPE, 1997.

(修改回稿日期 2008-08-13 编辑 韩晓渝)