

钻遇大型溶洞的油井参数及储层参数动态评价方法

于清艳¹,胡向阳¹,李勇²,贾英¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院,北京,100083; 2. 中国石油勘探开发研究院,北京,100083)

摘要:缝洞型碳酸盐岩油藏储集体类型多样,大型溶洞、溶孔及多尺度裂缝发育,储集体形态不规则、尺度差异大、连通性差,储层非均质性极强。大型溶洞是主要的储集空间,裂缝主要为渗流通道,油水分布复杂。目前基于地震资料解释的缝洞型储集体静态雕刻方法对油井地质储量评价的误差较大,且该静态方法无法评价其他油井参数和储层参数。利用油井实际生产数据,基于产量不稳定分析方法,提出了一种运用动态数据评价油井动态储量及其他储层参数和油井参数的新方法,即:将大尺度溶洞储集体模型视为大型溶洞与周围小尺度孔洞缝组成的多重介质复合模型,大型溶洞内的流体流动等效为自由流,周围复杂小尺度孔洞缝内流体流动等效为达西渗流,进而建立渗流-自由流耦合数学模型;通过求解获得缝洞体中油井的产量不稳定分析曲线,并进行各参数的敏感性分析。同时,经过规整化处理,构建归一化的Blasingame典型曲线图版,并通过图版的拟合最终建立储集体油井参数和储层参数的评价方法和流程。通过塔里木油田现场实际应用,验证了方法的可靠性和实用性,获得的储集体各项参数可评价油井生产动态及指导油藏下一步的合理开发部署。

关键词:多重介质;渗流-自由流耦合;复合模型;产量不稳定分析;动态储量;缝洞储集体;塔里木油田

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Dynamic evaluation of well and reservoir parameters on large-scale karst caverns encountered in drilling

Yu Qingyan¹, Hu Xiangyang¹, Li Yong², Jia Ying¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: The carbonate oil reservoirs of fractures and cavities are diverse in types with large-scale karst caverns, dissolved pores, and internal fractures of various scales. The reservoirs are characterized by extreme irregularity in morphology, large differences in scale, poor connectivity, resulting in extremely strong heterogeneity. Among others, large-scale karst caverns are the main reservoir type; fractures are the major seepage channels; and the contacts between oil and water layers are complicated. Currently, the static sculpturing of fractured-vuggy unit based on seismic interpretation usually results in large inconsistency in assessment of oil in place, and cannot be applied to evaluate other oil and reservoir parameters. To improve the accuracy in assessment, we propose a new method for the assessment of oil in place and other reservoir parameters by dynamic data based on actual production data and dynamic production analysis. In the new method, large-scale karst cavern reservoirs is simplified as a composite model of multi-porosity media with an integration of large-scale karst caverns and surrounding small-scale pores, cavities and cracks. The fluid flow in large-scale karst caverns is regarded as free flow, while that in the surrounding multi-porosity media is equivalent to Darcy flow, and then the corresponding mathematical model is built in coupling Darcy flow with free flow. Afterwards, the dynamic production curves and the parameter sensitivity analysis are obtained by solving the mathematical equation. Finally, the cross-plot of normalized Blasingame typical curves is built, and the fitting of the plot with actual production data solves well and reservoir parameters. The field application to the Tarim oilfield verifies the reliability and practicability of the newly-proposed method. And the parameters acquired can be applied to the assessment of dynamic oil production and to guide more reasonable infill well emplacement and recovery enhancement.

收稿日期:2019-07-15;修订日期:2020-01-12。

第一作者简介:于清艳(1989—),女,博士,油气田开发。E-mail: yuqingyan_syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51874346)。

Key words: multi-porosity medium, Darcy flow-free flow coupling, composite model, dynamic production analysis, dynamic reserve, fractured-vuggy reservoir, Tarim oilfield

近年来,随着中国油气勘探开发程度越来越高,开发难度也逐渐增大。总体上,勘探开发由陆相向海相转移,由碎屑岩储层向碳酸盐岩储层转移^[1-2]。通过地震反演和储集体静态雕刻可知,碳酸盐岩储层可分为裂缝型、缝洞型、基质孔隙型以及溶洞型等多种类型^[3-6]。中国缝洞型碳酸盐岩油藏多以洞穴型为主,且连通性差,油水分布复杂。近年来缝洞型油藏实现了快速上产,但由于油气富集模式多样,且存在渗流、自由流等多种流动状态,导致缝洞型储集体发育模式及其分布规律认识不清,静态雕刻储量不够准确,同时储集体油井参数和储层参数无法通过静态方法准确确定。

针对此类缝洞型复杂储层,在数学表征方面国内外学者已进行了一些研究。常见的数学表征方法为通过引入三重孔隙的概念,建立了三孔单渗模型^[7-12]和三孔双渗模型^[13],并在多重介质的基础上进行了试井理论研究^[14-16],此外,部分学者还以管流^[17-19]、渗-管流耦合^[20-21]等理论为基础进行了相关理论研究。例如, Li 等^[22]利用试井等动态诊断手段将缝洞型碳酸盐岩储集体分为两大类:均质型和复合型,其中根据储集体内部具体的孔洞缝分布,复合型储集体包括径向复合内好外差、径向复合内差外好等类型,并对不同储集体油井的生产特征进行了评价。杨磊等^[23]通过研究缝洞型碳酸盐岩储层,将其储集体类型分为均匀基质、封闭溶洞、双重介质和串珠状储层4类,并为这4类分别选定了试井解释数学模型近似处理:均质模型、径向复合、双重介质、串并联模型^[24-25]。总体来说,目

前对于尺度较小的裂缝型或溶洞型储层,多用均质多重模型来描述;对于内外区缝洞发育情况不同的储层,多用复合均质多重模型来描述,模型中流体流动大多仅考虑为渗流。可见,不同的缝洞空间组合可以简化为不同的储集体模式,进而决定了油井不同的生产动态曲线形态^[26-28]。

本文主要针对钻遇大型溶洞的油井,在目前储集体静态地质雕刻认识的基础上,将大型溶洞与其周围储层简化为单洞与多重介质复合模型,其中,大型溶洞中的流体流动等效为自由流,多重介质中的流体流动等效为达西渗流,建立了相应渗流-自由流耦合数学模型,通过解析求解得到了油井产量不稳定分析曲线,同时经过规整化处理^[29-32],获得了归一化的 Blasingame 拟合图版,进而经过图版的拟合,形成了油井参数、溶洞参数和其他储层参数等的评价方法和流程,用以指导缝洞型碳酸盐岩油藏的开发。

1 数学模型建立

当碳酸盐岩储层中发育大型溶洞,且溶洞周围分布均匀的小尺度孔洞缝储层时,可用简化大型溶洞与多重介质复合模型进行求解。

1.1 物理模型

图1为单洞与多重介质复合模型,油井直接打在溶洞上,溶洞周围为多重介质储层。其中,储集体简化为三维圆柱复合模型,大型溶洞为内部圆柱体,圆柱高

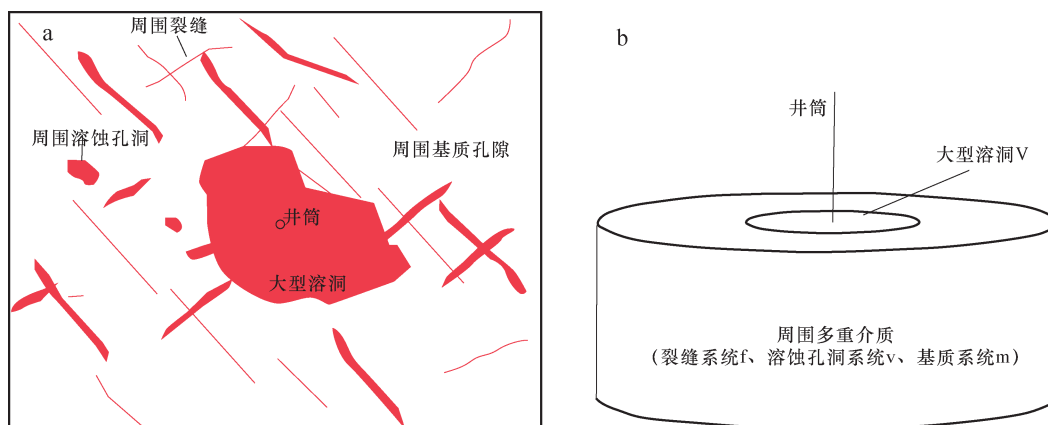


图1 单洞与多重介质复合模型

Fig. 1 The composite model of reservoirs of cavern-only and multi-porosity media

a. 静态雕刻示意图; b. 物理模型示意图

度为 h , 半径为 R ; 外部为多重介质, 与圆柱体同心。模型作如下假设: ①油井以定产量 q 生产; ②油藏依靠弹性开采; ③流体弱可压缩, 且其压缩系数为常数; ④大型溶洞弱可压缩, 且其压缩系数为常数, 其内流体为自由流; ⑤周围储层考虑为渗流; ⑥忽略重力、井筒储集效应和表皮效应的影响。

1.2 渗流 - 自由流耦合数学模型

模型的周围储层以三重介质为例, 且周围储层流体通过裂缝流入大型溶洞, 同时周围储层基质和溶蚀孔洞向裂缝中窜流。

流体在周围储层裂缝中渗流的偏微分方程为:

$$\frac{3.6K_f}{\mu} \left(\frac{\partial^2 p_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p_f}{\partial r} \right) + \frac{3.6\alpha_v K_v}{\mu} (p_v - p_f) + \frac{3.6\alpha_m K_m}{\mu} (p_m - p_f) = \Phi_f C_{if} \frac{\partial p_f}{\partial t} \quad (1)$$

流体在周围储层溶蚀孔洞中渗流的偏微分方程为:

$$-\frac{3.6\alpha_v K_v}{\mu} (p_v - p_f) = \Phi_v C_{iv} \frac{\partial p_v}{\partial t} \quad (2)$$

流体在周围储层基质中渗流的偏微分方程为:

$$-\frac{3.6\alpha_m K_m}{\mu} (p_m - p_f) = \Phi_m C_{im} \frac{\partial p_m}{\partial t} \quad (3)$$

周围储层通过裂缝与大型溶洞相连, 由大型溶洞质量守恒定律可得,

$$\frac{B_o q}{24} - 7.2\pi R h \frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\pi R^2 h C_{iv} \Phi_v \frac{\partial p_v}{\partial t} \Big|_{r=R} \quad (4)$$

大型溶洞考虑为自由流的等势体, 则大型溶洞中,

$$p_f|_{r=R} = p_w = p_v|_{r=R} \quad (5)$$

封闭外边界条件为:

$$\frac{\partial p_f}{\partial r} \Big|_{r=r_e} = 0 \quad (6)$$

初始条件为:

$$p_v|_{t=0} = p_f|_{t=0} = p_m|_{t=0} = p_v|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

式中: R 为大型溶洞半径, m; r 为任一点到井的径向距离, m; r_e 为泄油半径, m; q 为油井的地面产量, m^3/d ; t 为生产时间, h; B_o 为原油体积系数, 无量纲; μ 为原油粘度, $mPa \cdot s$; K_v, K_f, K_m 分别为周围溶蚀孔洞系统、裂缝系统、基质系统渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; p_m, p_v, p_f, p_w, p_v 分别为周围基质系统、溶蚀孔洞系统、裂缝系统、井底和大型溶洞压力, MPa; $\Phi_m, \Phi_v, \Phi_f, \Phi_v$ 分别为周围基质

系统、溶蚀孔洞系统、裂缝系统和大型溶洞的孔隙度; $C_{im}, C_{if}, C_{iv}, C_{iv}$ 分别为周围基质系统、裂缝系统、溶蚀孔洞系统和大型溶洞的综合压缩系数, $1/MPa$; α_m, α_v 分别为周围基质系统、溶蚀孔洞系统形状因子, $1/m^2$; h 为储层厚度, m。

引入下列无因次变量:

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad (8)$$

$$r_{eD} = \frac{r_e}{r_w} \quad (9)$$

$$R_D = \frac{R}{r_w} \quad (10)$$

$$p_{f,m,v,VD}(r_D, t_D) = \frac{K_f h}{1.842 \times 10^{-3} B q \mu} [p_i - p_{f,m,v,v}(r, t)] \quad (11)$$

$$t_D = \frac{3.6K_f t}{(\Phi_f C_{if} + \Phi_m C_{im} + \Phi_v C_{iv}) \mu r_w^2} \quad (12)$$

$$\lambda_{m,v} = \frac{\alpha_{m,v} K_{m,v} r_w^2}{K_f} \quad (13)$$

$$\omega_{f,m,v,v} = \frac{\Phi_{f,m,v,v} C_{if,tm,tv,tv}}{\Phi_f C_{if} + \Phi_m C_{im} + \Phi_v C_{iv} + \Phi_v C_{iv}} \quad (14)$$

式中: r_D 为无因次半径, 无量纲; r_w 为井筒半径, m; r_{eD} 为无因次泄气半径, 无量纲; R_D 为无因次大型洞穴半径, 无量纲; $p_{f,m,v,VD}$ 分别为周围裂缝系统、基质系统、溶蚀孔洞系统和大型溶洞无因次压力, 无量纲; p_i 为原始地层压力, MPa; $\lambda_{m,v}$ 分别为周围基质系统、溶蚀孔洞系统向裂缝系统的窜流系数, 无量纲; $\omega_{f,m,v,v}$ 分别为周围裂缝系统、基质系统、溶蚀孔洞系统和大型溶洞储容系数, 小数。

则, 整体油井无因次流动数学模型为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 p_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \left(\frac{\partial p_D}{\partial r_D} \right) + \lambda_m (p_{mD} - p_{vD}) + \lambda_v (p_{vD} - p_{vD}) = \omega_f \frac{\partial p_D}{\partial t_D} \\ \omega_m \frac{\partial p_{mD}}{\partial t_D} + \lambda_m (p_{mD} - p_{vD}) = 0 \\ \omega_v \frac{\partial p_{vD}}{\partial t_D} + \lambda_v (p_{vD} - p_{vD}) = 0 \\ 1 + R_D \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=R_D} = R_D^2 \omega_v \frac{\partial p_{vD}}{\partial t_D} \Big|_{r_D=R_D} \\ p_D|_{r_D=R_D} = p_{wD} = p_{vD} \\ p_{mD}|_{t=0} = p_{vD}|_{t=0} = p_{vD}|_{t=0} = p_{vD}|_{t=0} = 0 \\ \frac{\partial p_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=r_{eD}} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: p_{wD} 为无因次井底流压, 无量纲。

经拉普拉斯变换后:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \tilde{p}_{\text{mD}}}{\partial r_{\text{D}}^2} + \frac{1}{r_{\text{D}}} \left(\frac{\partial \tilde{p}_{\text{mD}}}{\partial r_{\text{D}}} \right) + \lambda_{\text{m}} (\tilde{p}_{\text{mD}} - \tilde{p}_{\text{vD}}) \\ + \lambda_{\text{v}} (\tilde{p}_{\text{vD}} - \tilde{p}_{\text{fD}}) = \omega_{\text{f}} s \tilde{p}_{\text{fD}} \\ \omega_{\text{m}} s \tilde{p}_{\text{mD}} + \lambda_{\text{m}} (\tilde{p}_{\text{mD}} - \tilde{p}_{\text{vD}}) = 0 \\ \omega_{\text{v}} s \tilde{p}_{\text{vD}} + \lambda_{\text{v}} (\tilde{p}_{\text{vD}} - \tilde{p}_{\text{fD}}) = 0 \\ \left. \frac{1}{s} + R_{\text{D}} \frac{\partial \tilde{p}_{\text{mD}}}{\partial r_{\text{D}}} \right|_{r_{\text{D}}=R_{\text{D}}} = R_{\text{D}}^2 \omega_{\text{v}} s \tilde{p}_{\text{vD}} \Big|_{r_{\text{D}}=R_{\text{D}}} \\ \tilde{p}_{\text{fD}} \Big|_{r_{\text{D}}=R_{\text{D}}} = \tilde{p}_{\text{wD}} = \tilde{p}_{\text{vD}} \\ \tilde{p}_{\text{mD}} \Big|_{t=0} = \tilde{p}_{\text{fD}} \Big|_{t=0} = \tilde{p}_{\text{vD}} \Big|_{t=0} = \tilde{p}_{\text{vD}} \Big|_{t=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial \tilde{p}_{\text{mD}}}{\partial r_{\text{D}}} \right|_{r_{\text{D}}=r_{\text{eD}}} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\tilde{p}_{\text{f,m,v,wD}}$ 分别为周围裂缝系统、基质系统、溶蚀孔洞系统、大型溶洞和井底拉氏空间无因次压力, 无量纲; s 为基于无因次时间 t_{D} 的 Laplace 变量, 无因次。

联立方程, 可得以上方程的通解,

$$\tilde{p}_{\text{mD}} = AI_0(\sigma r_{\text{D}}) + BK_0(\sigma r_{\text{D}}) \quad (17)$$

式中: A, B 为常数, 无量纲; K_0 为第二类零阶虚宗量变形贝塞尔函数; I_0 为第一类零阶虚宗量变形贝塞尔函数。

对公式(17)求导后, 代入公式(16)中的内边界和外边界条件, 可得无因次井底流压 Laplace 空间解:

$$\tilde{p}_{\text{wD}} = \frac{Y_1 I_0(R_{\text{D}} \sigma) + K_0(R_{\text{D}} \sigma)}{s(Y_3 - Y_1 Y_2)} \quad (18)$$

其中,

$$Y_1 = \frac{K_1(r_{\text{eD}} \sigma)}{I_1(r_{\text{eD}} \sigma)} \quad (19)$$

$$Y_2 = R_{\text{D}} \sigma I_1(R_{\text{D}} \sigma) - R_{\text{D}}^2 \omega_{\text{v}} s I_0(R_{\text{D}} \sigma) \quad (20)$$

$$Y_3 = R_{\text{D}} \sigma K_1(R_{\text{D}} \sigma) + R_{\text{D}}^2 \omega_{\text{v}} s K_0(R_{\text{D}} \sigma) \quad (21)$$

$$\sigma = \sqrt{s f(s)} = \sqrt{s \left(w_{\text{f}} + \frac{\lambda_{\text{m}} \omega_{\text{m}}}{\omega_{\text{m}} s + \lambda_{\text{m}}} + \frac{\lambda_{\text{v}} \omega_{\text{v}}}{\omega_{\text{v}} s + \lambda_{\text{v}}} \right)} \quad (22)$$

式中: K_1 为第二类一阶虚宗量变形贝塞尔函数; I_1 为第一类一阶虚宗量变形贝塞尔函数; Y_1, Y_2, Y_3, σ 分别为中间变量。

利用 Duhamel 原理, 井底无因次产量拉氏解为:

$$\tilde{q}_{\text{D}}(s) = \frac{1}{s^2 \tilde{p}_{\text{wD}}(s)} \quad (23)$$

式中: $\tilde{q}_{\text{D}}$ 为拉氏空间无因次产量, 无量纲。

2 常规产量不稳定敏感性分析

对上述拉氏解进行数值反演, 以无因次产量 q_{D} 、无因次产量积分 q_{Di} 和无因次产量积分导数 q_{Did} 的对数作纵坐标, 以无因次时间 t_{D} 的对数为横坐标, 绘制油井产量不稳定分析曲线, 如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 单洞与多重介质复合模型特征曲线可以分为七个阶段: I 为大型溶洞反应阶段, 相当于一个扩大的“井筒”, 表现出井筒储集效应, 无因次产量积分与产量积分导数曲线重合为斜率为“-1”的直线; II 为外围多重介质裂缝线性流与径向流反应阶段, 主要与多重介质中裂缝的性质有关; III 为外围多重介质中溶蚀孔洞向裂缝窜流阶段, 无因次产量积分导数曲线出现第一个“凹子”; IV 为多重介质裂缝与溶蚀孔洞整体的径向流阶段, 无因次产量积分与产量积分导数曲线平行; V 为多重介质中基质系统向裂缝窜流阶段, 无因次产量积分导数曲线出现第二个“凹子”; VI 为外围多重介质整体径向流阶段; VII 为边界控制流阶段, 对于封闭边界, 产量积分曲线与产量积分导数曲线重合为斜率为“-1”的直线。且若 $\omega_{\text{v}} = 0$, 单洞与三重介质复合模型可以简化为单洞与双重介质复合模型; 若 $\omega_{\text{v}} = 0, \omega_{\text{f}} = 0.8$, 模型可以简化为单洞与单重介质复合模型。

图 3 为单洞与多重介质复合模型油井产量不稳定分析曲线影响因素的敏感性分析。由图 3a 可以看出, 中心大型溶洞半径 R_{D} 越大, 无因次产量积分与产量积分导数曲线相交的直线越靠上, 反映的井筒储集效应阶段持续时间越长。图 3b 中, ω_{v} 对曲线的影响与 R_{D} 类似, 但影响相对较小。图 3c 中可知, 随着周围储层泄气半径 r_{eD} 的增大, 边界控制流阶段曲线是逐渐靠后的。由 Blasingame 理论可知^[29-32], 运用常规产量不稳

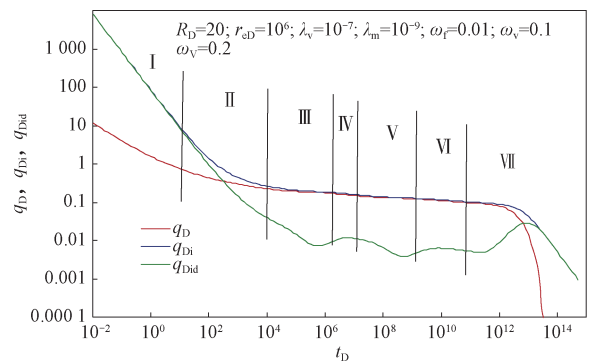


图 2 油井产量不稳定分析曲线

Fig. 2 Oil production variation analysis curves

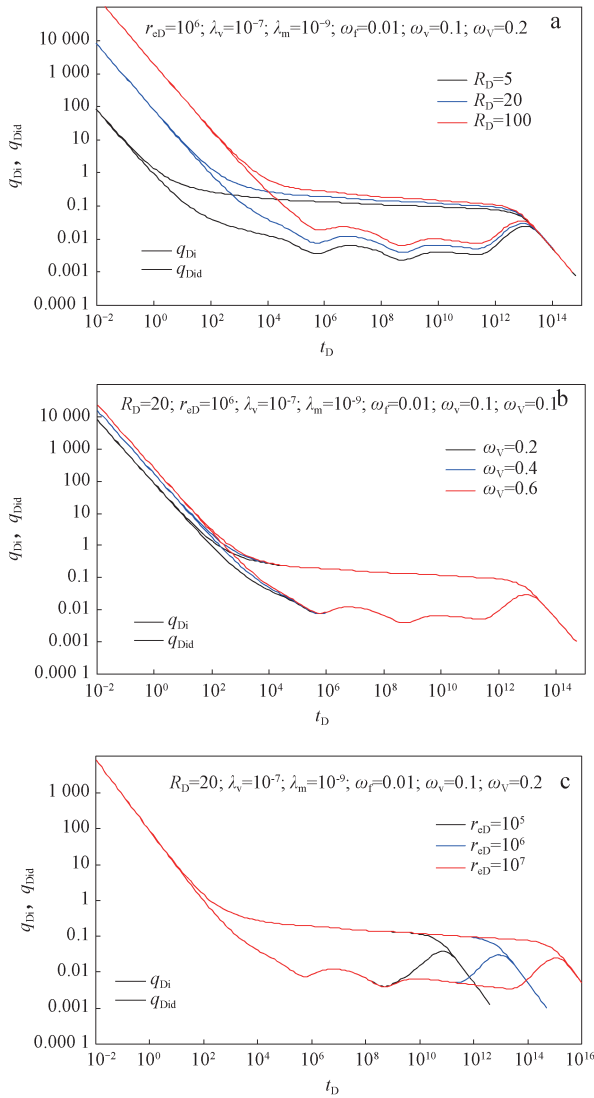


图3 不同参数对产量不稳定分析曲线的影响

Fig. 3 Impact of different parameters on the production analysis curves

a. R_D 对产量不稳定分析曲线的影响; b. ω_v 对产量不稳定分析曲线的影响; c. r_{eD} 对产量不稳定分析曲线的影响

定分析图版, 由于边界控制阶段曲线的变化, 拟合获得的储层参数和油井参数存在多解性问题。

3 Blasingame 典型曲线图版的绘制

通过 Blasingame 变换^[29-32], 利用公式(24)——(27), 最终可获得无因次规整化产量 q_{Dd} 、无因次规整化产量积分 q_{Ddi} 以及无因次规整化产量积分导数 q_{Ddid} 随物质平衡时间 t_{Dd} 的变化曲线。

$$t_{Dd} = \frac{t_D}{\frac{1}{2}(r_{eD}^2 - 1) \left(\ln r_{eD} - \frac{1}{2} \right)} \quad (24)$$

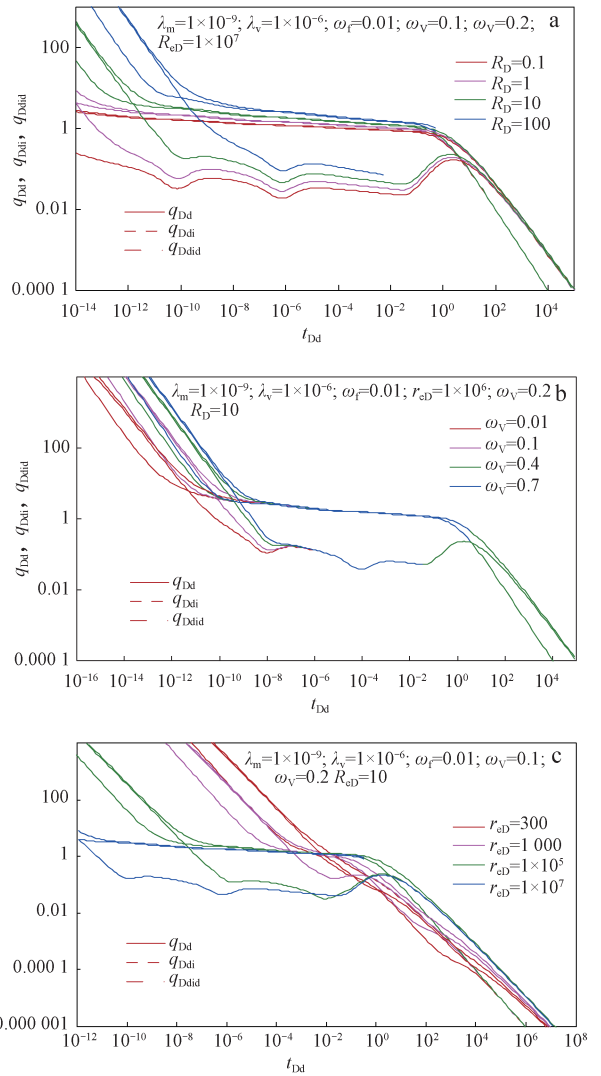


图4 Blasingame 典型曲线图版敏感性分析

Fig. 4 Parameter sensitivity analyses of typical Blasingame curves

a. R_D 对产量不稳定分析曲线的影响; b. ω_v 对产量不稳定分析曲线的影响; c. r_{eD} 对产量不稳定分析曲线的影响

$$q_{Dd} = \frac{\ln r_{eD} - \frac{1}{2}}{L^{-1}(\tilde{p}_{wD})} \quad (25)$$

$$q_{Ddi} = \frac{\int_0^{t_{Dd}} q_{Dd}(\tau) d\tau}{t_{Dd}} \quad (26)$$

$$q_{Ddid} = q_{Ddi} - q_{Dd} \quad (27)$$

式中: q_{Dd} 为无因次规整化产量, 无量纲; q_{Ddi} 为无因次规整化产量积分, 无量纲; q_{Ddid} 为无因次规整化产量积分导数; t_{Dd} 为无因次物质平衡时间, 无量纲。

经过变换, 可得单洞与多重介质复合模型的 Blasingame 产量不稳定分析典型曲线图版, 其参数敏感性分析如图4所示。

由图4c可以看出,Blasingame 典型曲线早期的不稳定流阶段为一组对应不同无因次井控半径 r_{eD} 的曲线, r_{eD} 越大, 曲线的不稳定流阶段越往下, 而曲线的边界控制流阶段汇聚成一条斜率为“-1”的直线, 其值不会随着 r_{eD} 的改变而左右移动。可见, 经过 Blasingame 变换的处理, r_{eD} 不再影响边界控制流阶段, 仅影响不稳定流阶段, 这对于储层参数的拟合, 尤其对于动态储量的获得减少了较多的不确定性。

4 典型曲线图版拟合步骤

根据常规单重介质封闭储层 Blasingame 拟合方法可知^[29-32], 规整化处理后的实际生产数据拟合典型曲线图版的不稳定流阶段可获得泄油半径、储层渗透率等参数, 拟合典型曲线图版的边界控制流阶段可确定油井动态储量等参数。则对于大型溶洞与多重介质复合储层, 可根据缝洞体静态储集体模型, 选择合适的大型溶洞与多重介质 Blasingame 拟合图版进行拟合, 具体的操作步骤为:

1) 油井实际生产数据的规整化处理, 根据公式(28)——(31)可获得油井实际生产数据的规整化产量 q_{Dd} 、规整化产量积分 q_{di} 、规整化产量积分导数 q_{did} 以及物质平衡时间 t_d ;

2) 绘制规整化参数与物质平衡时间的三条曲线;

3) 结合储层静态储集体模型, 规整化后的实际生产数据通过拟合不稳定流阶段图版曲线, 可确定大型溶洞半径、周围储层的泄气半径、周围储层的渗透率等参数; 通过拟合边界控制流阶段图版曲线, 可确定周围储层的动态储量, 且通过与大型溶洞结合, 根据公式(32)可确定油井的最终动态储量。

$$t_d = \frac{N_p}{q} \quad (28)$$

$$q_d = \frac{q}{p_i - p_{wf}} \quad (29)$$

$$q_{di} = \frac{1}{t_d} \int_0^a q_d d\tau \quad (30)$$

$$q_{did} = -t_d \frac{dq_{di}}{dt_d} \quad (31)$$

$$N = \frac{1}{C_t} \left(\frac{t_d}{t_{Dd}} \right) \left(\frac{q_d}{q_{Dd}} \right) + \pi R^2 h \Phi_v (1 - S_w) \quad (32)$$

式中: t_d 为油井物质平衡时间, d; q_d 为油井规整化产量, $m^3/(d \cdot MPa)$; q_{di} 为油井规整化产量积分, $m^3/(d \cdot MPa)$; q_{did} 为油井规整化产量积分导数, $m^3/(d \cdot MPa)$; N_p

为油井累计产油量, m^3 ; q 为油井日产油量, m^3 ; p_{wf} 为井底流压, MPa; N 为油井动态储量, m^3 ; C_t 为周围储层综合压缩系数, MPa^{-1} ; S_w 为大型溶洞水的饱和度, 小数。

5 实例应用

塔里木油田某井钻井资料显示, 当钻遇目的层位时, 出现钻杆放空和泥浆大量漏失等现象, 说明井钻遇了大型溶洞或裂缝。由静态储集体模型可知, T1 井是通过大型溶洞与周围多重介质储层相连的一口油井, 其初期产量相对较高且投产油压高, 其生产动态曲线如图5所示。

基于以上大型溶洞与多重介质复合模型 Blasingame 图版拟合方法及步骤, 处理 T1 井的生产数据并进行图版拟合, 拟合结果如图6所示。由拟合结果可知, 无因次大型溶洞半径 R_D 为 20, 泄气半径 r_{eD} 为 300, $q_d/q_{Dd} = 1/0.08$, $t_d/t_{Dd} = 1/0.02$ 。则计算得到大型溶洞半径约为 2.14 m, 由公式(32)可计算得到评价的动态储量大小约为 $27.95 \times 10^4 m^3$, 解释结果与现场实际地质和钻井数据吻合较好。可见, 通过图版拟合, 利用油井的生产数据即可快速确定大型溶洞参数、周围多重介质参数以及油井动态储量等油井参数, 同时

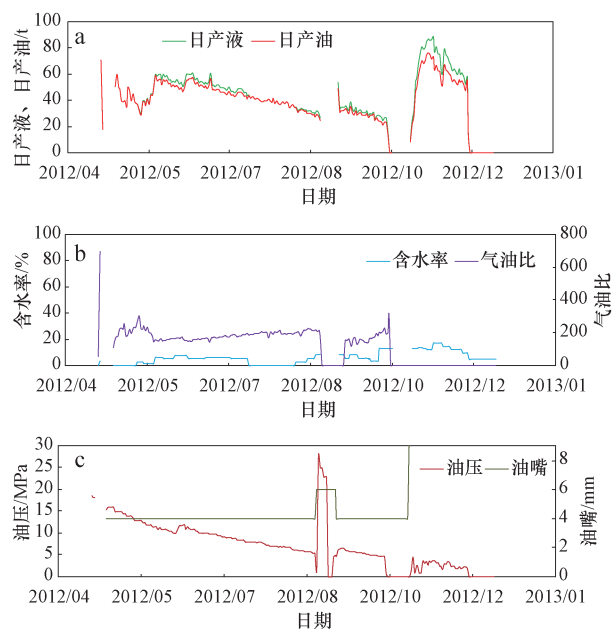


图5 塔里木油田 T1 井生产动态曲线

Fig. 5 Curves of the dynamic production data in Well T1, Tarim Basin

a. 日产液和日产油变化曲线; b. 含水率和气油比变化曲线; c. 油压和油嘴大小变化曲线

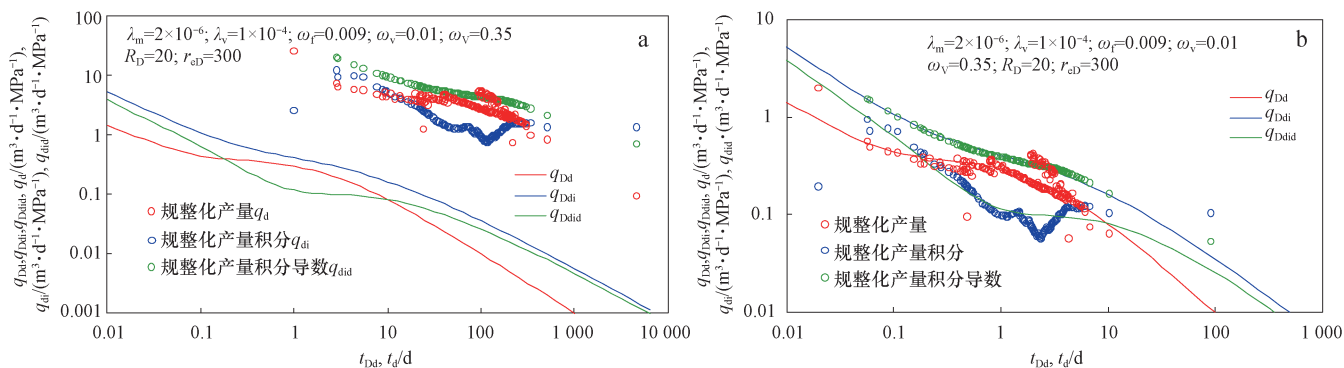


图6 油井实际生产数据归一化曲线图版拟合结果

Fig.6 Fitting of the cross-plots of normalized Blasingame typical curves with actual production data

a. 图版拟合前; b. 图版拟合后

可判断油井生产状况,最终指导油藏下一步合理开发部署。

6 结论

1) 缝洞型碳酸盐岩储层由于大型溶洞、溶蚀孔洞和裂缝的存在,流体流动包含自由流、渗流等多种流动形式。

2) 针对钻遇大型溶洞的油井,可简化为大型溶洞与周围孔缝储层组成的复合模型,其中大型溶洞中为自由流,井周储层中为多重介质渗流,最终建立了渗流—自由流耦合的数学模型,并进行了求解,获得了油井的产量不稳定分析曲线,并进行了敏感性分析。

3) 通过规整化处理,获得了大型溶洞与多重介质复合模型的 Blasingame 典型曲线图版,边界控制流阶段曲线归一化,减少了图版拟合过程的不确定性。

4) 通过图版拟合,最终可确定大型溶洞参数、周围多重介质参数以及油井动态储量等油井参数,同时可判断油井生产状况,是否有能量补充和水侵等,为实际油井的合理开发提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 韩大匡. 中国油气田开发现状、面临的挑战和技术发展方向[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 51-57.
Han Dakuang. Status and challenges for oil and gas field development in China and directions for the development of corresponding technologies[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(5): 51-57.
- [2] 张抗. 中国油气产区战略接替形势与展望[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 513-523.
Zhang Kang. Strategic replacement situation and outlook of China oil-gas production area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 513-523.
- [3] 赫俊民, 王小焱, 孙建芳, 等. 塔里木盆地塔河地区中-下奥陶统碳酸盐岩储层天然裂缝发育特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 1022-1030.
Hao Junmin, Wang Xiaoyao, Sun Jianfang, et al. Characteristics and main controlling factors of natural fractures in the Lower-to-Middle Ordovician carbonate reservoirs in Tahe area, Northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1022-1030.
- [4] 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北油田断控缝洞型储层特征与主控因素[J]. 特种油气藏, 2019, 26(5): 8-13.
Zhao Rui, Zhao Teng, Li Huili, et al. Fault-controlled fracture-cavity reservoir characterization and main-controlling factors in the Shunbei hydrocarbon field of Tarim Basin[J]. Special oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(5): 8-13.
- [5] 胥念民, 王艳忠, 操应长, 等. 东营凹陷下古生界碳酸盐岩古潜山储层储集空间特征及发育模式[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 355-365.
Zan Nianmin, Wang Yanzhong, Cao Yingchang, et al. Characteristics and development patterns of reservoir space of the Lower Paleozoic buried hills in Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 356-365.
- [6] 吕心瑞, 李红凯, 魏荷花, 等. 碳酸盐岩储层多尺度缝洞体分类表征—以塔河油田 S80 单元奥陶系油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 813-821.
Lv Xinrui, Li Hongkai, Wei Hehua, et al. Classification and characterization method for multi-scale fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoirs: An example from Ordovician reservoirs in Tahe oil-field S80 unit[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 813-821.
- [7] Abdassah D, Ershaghi I. Triple-porosity systems for representing naturally fractured reservoirs[J]. SPE (Society of Petroleum Engineers) Formation Evaluation, 1986, 1(2): 1-8.
- [8] Gomez S, Camacho R, Vasquez M, et al. Well test characterization of naturally fractured vuggy reservoirs with a global optimization method[J]. OTC-24762-MS, 2014.
- [9] Liu J C, Bodvarsson G S, Wu Y S. Analysis of pressure behavior in fractured lithophysal reservoirs[J]. Journal of Contaminant Hydrolo-

- gy, 2003(26):189-211.
- [10] Ezulike D O, Dehghanpour H. Characterizing tight oil reservoirs using dual- and triple-porosity models[J]. SPE 167126, 2013.
- [11] 杨坚, 姚军, 王子胜. 三重介质复合油藏压力动态特征研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(4):418-425.
- Yang Jian, Yao Jun, Wang Zisheng. Study of pressure transient characteristic for triple medium composite reservoirs[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(4):418-425.
- [12] 姚军, 戴卫华, 王子胜. 变井筒储存的三重介质油藏试井解释方法研究[J]. 石油大学学报, 2004, 28(1):46-51.
- Yao Jun, Dai Weihua, Wang Zisheng. Well test interpretation method for triple medium reservoir with variable wellbore storage[J]. Journal of the University of Petroleum, 2004, 28(1):46-51.
- [13] Al-Ghamdi A, Ershaghi I. Pressure transient analysis of dually fractured reservoirs[J]. SPE Journal, 1996, 1(1):93-100.
- [14] Wu Y S, Ehlig-Economides C, Qin G, et al. A triple-continuum pressure-transient model for a naturally fractured vuggy reservoir[J]. SPE 110044, 2007.
- [15] 姚军. 缝洞型碳酸盐岩油藏试井解释理论与方法[M]. 北京: 石油大学出版社, 2007:1-20.
- Yao Jun. Theory and method of well test interpretation for fracture-vuggy carbonate reservoir[M]. Beijing: Petroleum University Press, 2007:1-20.
- [16] 常学军, 姚军, 戴卫华, 等. 裂缝和洞与井筒连通的三重介质油藏试井解释方法研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(3):339-346.
- Chang Xuejun, Yao Jun, Dai Weihua, et al. The study of well test interpretation method for a triple medium reservoir[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(3):339-346.
- [17] 朱桂良, 孙建芳, 刘中春. 塔河油田缝洞型油藏气驱动用储量计算方法[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2):436-450.
- Zhu Guiliang, Sun Jianfang, Liu Zhongchun. An approach to calculate developed reserves in gas drive fractured-vuggy reservoirs in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):436-450.
- [18] 林然, 黄炳光, 王怒涛, 等. 缝洞型碳酸盐岩储集层中气体流动新研究[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(4):451-454.
- Lin Ran, Huang Bingguang, Wang Nutao, et al. A new approach to gas flow in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(4):451-454.
- [19] 刘学利, 彭小龙, 杜志敏, 等. 油水两相流 Darcy-Stokes 模型[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(6):89-92.
- Liu Xueli, Peng Xiaolong, Du Zhimin, et al. Oil water two phase flow Darcy-Stokes model[J]. Journal of Petroleum University, 2007, 29(6):89-92.
- [20] 林加恩, 李亮, 杨慧珠. 管流与渗流耦合流动理论研究初探[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(2):11-15.
- Lin Jia'en, Li Liang, Yang Huizhu. Primary investigation of the coupling of channel flow with seepage[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22(2):11-15.
- [21] Urquiza J M, N'dri D, Garon A, et al. Coupling Stokes and Darcy equations[J]. Applied Numerical Mathematics, 2008, 58(5):525-538.
- [22] Li Y, Li B Z, Hu Y L, et al. Classification of carbonate gas condensate reservoirs using well test and production data analyses[J]. Petroleum Science, 2011, 29(1):70-78.
- [23] 杨磊, 凌涛, 胥猛生, 等. 英买2缝洞型碳酸盐岩油藏试井曲线特征分析[J]. 油气井测试, 2012, 21(6):15-17.
- Yang Lei, Ling Tao, Xu Mengsheng, et al. Well test curve analysis of YM2 fracture-cave carbonate reservoir[J]. Well Testing, 2012, 21(6):15-17.
- [24] 熊钰, 叶海峰, 蔡明金, 等. 大尺度串联双缝洞碳酸盐岩油藏的压力响应分析[J]. 油气藏评价与开发, 2018, 8(2):22-29.
- Xiong Yu, Ye Haifeng, Cai Mingjin, et al. Pressure response analysis of large scale series double fracture-cavity carbonate reservoir[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(2):22-29.
- [25] 孙东, 潘建国, 雍学善, 等. 碳酸盐岩储层垂向长串珠形成机制[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(1):101-106.
- Sun Dong, Pan Jianguo, Yong Xueshan, et al. Formation mechanism of vertical "long string beads" in carbonate reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(1):101-106.
- [26] 杨敏, 孙鹏, 李占坤. 塔河油田碳酸盐岩油藏试井曲线分类及其生产特征分析[J]. 油气井测试, 2004, 13(1):119-122.
- Yang Min, Sun Peng, Li Zhankun. Testing curve's classification for carbonate reservoir in Tahe oilfield and its characteristics analysis[J]. Well Testing, 2004, 13(1):19-21.
- [27] 陈志海, 戴勇, 郎兆新. 缝洞性碳酸盐岩油藏储渗模式及其开采特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3):101-105.
- Chen Zhihai, Dai Yong, Lang Zhaoxin. Storage-percolation modes and production performance of the karst reservoirs in Tahe oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(3):101-105.
- [28] 尹洪军, 邢翠巧, 计秉玉, 等. 大尺度溶洞发育的缝洞型油藏试井解释模型研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(5):84-88.
- Yin Hongjun, Xing Cuiqiao, Ji Bingyu, et al. Well test interpretation model for fracture-cavity reservoir with well-developed large-scale caves[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(5):84-88.
- [29] Blasingame T A, Lee W J, 1986. Variable-rate reservoir limits testing. SPE 15028, 1986.
- [30] Blasingame T A, Lee W J. The variable-rate reservoir limits testing of gas wells. SPE 17708-MS, 1988.
- [31] Blasingame T A, Johnston J L, Lee W J. Type-curve analysis using the pressure integral method. SPE 18799, 1989.
- [32] Blasingame T A, McCray T L, Lee W J. Decline curve analysis for variable pressure drop/variable flowrate systems. SPE 21513-MS, 1991.

(编辑 张玉银)