

文章编号:0253-9985(2010)01-0054-03

缝洞型碳酸盐岩油藏油井产量及压力变化模型

赵艳艳,袁向春,康志江

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:建立了缝洞型碳酸盐岩油藏多缝多洞串联型油藏流体流动的数学模型,得出了产量和压力的变化规律。单缝单洞油藏的产量和压力均呈指数递减,多缝多洞油藏靠近生产井的溶洞产量的递减规律为几个指数递减函数的代数和,压力的递减规律为几个指数递减函数与井底流压的代数和。以同等大小的三缝三洞油藏为例,远离生产井的溶洞压力下降速度远远慢于靠近生产井的溶洞;生产初期产量主要是靠近生产井的溶洞在作贡献,远离生产井的溶洞逐渐开始补充。这对于缝洞型碳酸盐岩油藏油井的动态分析和预测,认识缝洞连通模式和缝洞参数,以及储量计算有一定的理论意义。

关键词:产量;压力;数学模型;动态分析;缝洞型碳酸盐岩油藏

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Flow rate and pressure variation modeling for production wells in fractured-vuggy carbonates reservoirs

Zhao Yanyan, Yuan Xiangchun, and Kang Zhijiang

(SINOPEC Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: A mathematical model is built for fluid flow in fractured-vuggy carbonate reservoirs with multiple fractures and vugs connected in series to analyze the patterns of flow rate and pressure changes. In reservoirs with ideal single fracture and single vug, both the flow rate and pressure decline exponentially. However, in reservoirs with multiple fractures and multiple vugs, the flow rate and pressure decrease much differently. For vugs near production wells, the decline of flow rate is the algebraic sum of several exponential decline functions, and the decline of pressure is the algebraic sum of several exponential decline functions and bottom hole flowing pressure. Taking the ideal triple fracture-triple vug reservoirs with the same sizes as examples, the pressure decline in vugs far away from the production well is much slower than that in vugs near the production well. The vugs near the production well contribute most of the oil flow in the initial stage and the vugs far away from the well join in progressively later. The study bears certain theoretical significances for analyzing and predicting well performance in fractured-vuggy carbonates reservoirs, understanding the patterns of fracture-vug connection and parameters of fractures and vugs, and reserve calculation.

Keywords: flow rate, pressure, mathematical model, dynamic analysis, fractured-vuggy carbonate reservoir

缝洞型碳酸盐岩油藏的储集空间以缝、洞、孔为主。奥陶系油藏经过多次构造运动以及在此基础上的多期古岩溶作用,产生了一系列的断裂系统,形成了多种缝洞储集空间,绝大多数以次生裂

缝或溶蚀孔洞为有效储集空间。国内有些研究者提出用缝洞储集体^[1~3]的概念来描述储集层的分布。文献[4]初步探讨了塔河碳酸盐岩油田储集空间与储集体连通关系。多位研究者对此类油藏

收稿日期:2009-04-22。

第一作者简介:赵艳艳(1969—),女,高级工程师、博士,油气田开发。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2006CB202400)。

的储层特征及开发对策进行了研究和探讨^[5-10]。缝洞性碳酸盐岩油藏的缝洞连通模式决定其开采特征,即决定了油井的产量变化规律和压力变化规律。

1 数学模型的建立

1.1 单缝单洞缝洞型油藏

假定油井通过一长度为 L (m)、高为 h (m)、宽为 w (m) 的垂直裂缝与原始容积为 V_0 (m^3) 的溶洞相连 (图 1), 油井产量为 Q (t), 井底流压为 P_{wf} (MPa), 原始压力为 P_i (MPa), 某一时刻 t (d), 溶洞的压力为 P (MPa), 流体的压缩系数为 C (MPa^{-1}), 忽略裂缝和溶洞的可压缩性, 原油粘度为 μ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)。

根据裂缝中的渗流理论有^[11]:

$$Q = \frac{hw^3}{12} \frac{P - P_{\text{wf}}}{\mu L} \quad (1)$$

根据压缩系数的定义得溶洞中流体任意时刻 t 的体积 V (m^3) 为^[12]:

$$V = V_0 e^{-C(P-P_i)} \quad (2)$$

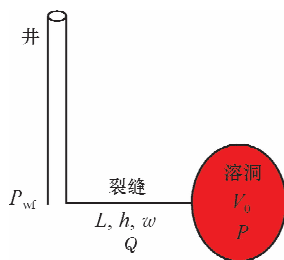


图1 单缝单洞油藏示意图

Fig. 1 Sketch map showing reservoirs with ideal single fracture and single vug

假定油井的产量完全由溶洞中流体的弹性膨胀得到,则有:

$$Q = \frac{dV}{dt} = -V_0 e^{-C(P-P_i)} C \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式有:

$$\frac{hw^3}{12} \frac{P - P_{\text{wf}}}{\mu L} = -V_0 e^{-C(P-P_i)} C \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{hw^3}{12} \frac{dt}{\mu L} = -V_0 C \frac{e^{-C(P-P_i)}}{P - P_{\text{wf}}} dP \quad (5)$$

对上式积分:

$$\int_0^t \frac{hw^3}{12} \frac{dt}{\mu L} = -V_0 C \int_{P_i}^P \frac{e^{-C(P-P_i)}}{P - P_{\text{wf}}} dP \quad (6)$$

$$\int_0^t \frac{hw^3}{12} \frac{dt}{\mu L} = -V_0 C e^{C(P_i-P_{\text{wf}})} \int_{C(P_i-P_{\text{wf}})}^{C(P-P_{\text{wf}})} \frac{e^{-C(P-P_{\text{wf}})}}{C(P - P_{\text{wf}})} \cdot d[C(P - P_{\text{wf}})] \quad (7)$$

因为液体的压缩系数 C 一般很小, $C(P - P_{\text{wf}}) < 0.01$, 由幂积分函数的近似公式得:

$$P - P_{\text{wf}} = (P_i - P_{\text{wf}}) e^{-\frac{hw^3 t}{12\mu LV_0 C e^{C(P_i-P_{\text{wf}})}}} \quad (8)$$

(8)式为洞中的压力变化公式。此式说明溶洞中的压力随时间呈指数变化。

(8)式代入(1)式得产量的变化规律为:

$$Q = \frac{hw^3}{12} \frac{1}{\mu L} (P_i - P_{\text{wf}}) e^{-\frac{hw^3 t}{12\mu LV_0 C e^{C(P_i-P_{\text{wf}})}}} = A e^{-Bt} \quad (9)$$

$$\text{其中: } A = \frac{hw^3}{12} \frac{1}{\mu L} (P_i - P_{\text{wf}}) \quad (10)$$

$$B = \frac{hw^3}{12\mu LV_0 C e^{C(P_i-P_{\text{wf}})}} \quad (11)$$

$$e = 2.718\ 281\ 824\ 59$$

由(9)式可知,产量随时间也呈指数关系递减。

1.2 多缝多洞串联型缝洞型油藏

假定缝洞型油藏为三缝三洞串联型 (图 2),

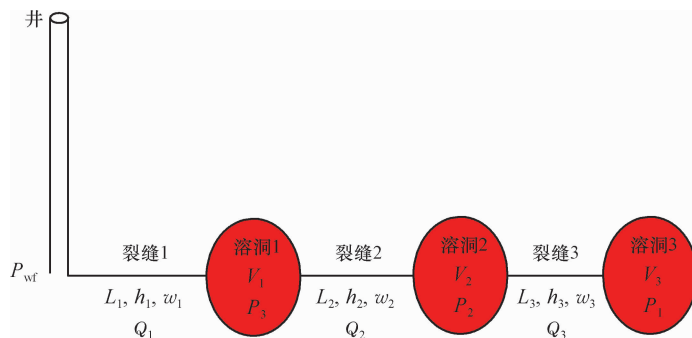


图2 三缝三洞缝洞型油藏示意图

Fig. 2 Sketch map showing reservoirs with ideal triple fractures and triple vugs

缝洞参数见图 2 所示,油井产量为 Q ,井底流压为 P_{wf} ,原始压力为 P_i ,某一时刻 t ,溶洞的压力分别为 P_1, P_2 和 P_3 ,流体的压缩系数为 C ,忽略裂缝和溶洞的可压缩性。

$$Q_3 = -CV_3 e^{-C(P_1-P_i)} \frac{dP_1}{dt} \tag{12}$$

$$Q_3 = \frac{P_1 - P_2}{L_3 \mu} h_3 \frac{w_3^3}{12} \tag{13}$$

$$-CV_3 e^{-C(P_1-P_i)} \frac{dP_1}{dt} = \frac{P_1 - P_2}{L_3 \mu} h_3 \frac{w_3^3}{12} \tag{14}$$

$$Q_2 = \frac{P_2 - P_3}{L_2 \mu} h_2 \frac{w_2^3}{12} \tag{15}$$

$$\frac{P_2 - P_3}{L_2 \mu} h_2 \frac{w_2^3}{12} - \frac{P_1 - P_2}{L_3 \mu} h_3 \frac{w_3^3}{12} = -CV_2 e^{-C(P_2-P_i)} \frac{dP_2}{dt} \tag{16}$$

$$Q_1 = \frac{P_3 - P_{wf}}{L_1 \mu} h_1 \frac{w_1^3}{12} \tag{17}$$

$$Q_1 - Q_2 = -CV_1 e^{-C(P_3-P_i)} \frac{dP_3}{dt} \tag{18}$$

$$\frac{P_3 - P_{wf}}{L_1 \mu} h_1 \frac{w_1^3}{12} - \frac{P_2 - P_3}{L_2 \mu} h_2 \frac{w_2^3}{12} = -CV_1 e^{-C(P_3-P_i)} \frac{dP_3}{dt} \tag{19}$$

联立式子 (13), (14), (15), (16), (17) 和 (19) 以及初始条件可解出三缝三洞串联型缝洞型油藏产量和 3 个溶洞内压力的变化规律。依此类推,如果油藏中有多个洞和多个缝串联,可以得出多个溶洞内压力和产量的变化规律。

2 计算实例

以三缝三洞串联型油藏为例,缝洞参数及地层压力如下:裂缝长度 L_1 和 L_2 均为 80 m;裂缝长度 L_3 为 40 m;裂缝宽度 w_1, w_2, w_3 均为 0.001 m;裂缝高度 h_1, h_2, h_3 均为 10 m;原油粘度为 90 mPa · s; CV_1, CV_2, CV_3 均为 2 500 m³/MPa;溶洞 1 原始压力 P_3 为 60 MPa;溶洞 2 原始压力 P_2 为 60 MPa;溶洞 3 原始压力 P_1 为 60 MPa;井底压力 P_{wf} 为 55 MPa。

解式 (14), (16) 和 (19) 以及初始条件可得三缝三洞串联型油藏中的压力变化规律,解出压力后代回到 (13), (15) 和 (17) 中,就可以得到产量变化规律。

$$P_1 = -0.999\,9e^{-0.008t} + 5.836\,8e^{-0.000\,816\,5t} + 0.163\,1e^{-0.010\,165t} + 55 \tag{20}$$

$$P_2 = 5.227\,7e^{-0.000\,834\,8t} - 0.227\,7e^{-0.019\,165t} + 55 \tag{21}$$

$$P_3 = 2.918e^{-0.000\,835t} + 0.082e^{-0.019\,165t} + 2e^{-0.008t} + 55 \tag{22}$$

解出压力后代回到 (13), (15) 和 (17) 中,就可以得到产量变化规律。溶洞 1 流入井底的流量的递减规律为几个指数递减函数的代数和,溶洞 2 和溶洞 3 流入到裂缝的流量的变化规律由溶洞 3, 2, 1 中的压力变化规律决定,由于远离生产井井底,所以初期对靠近生产井井底的洞的物质补充小,即溶洞 2 和溶洞 3 流入到裂缝的流量初期小;随着靠近生产井井底的洞的压力进一步降低,对靠近生产井井底的洞的物质补充加快,即溶洞 2 和溶洞 3 流入到裂缝的流量变大;随着溶洞 2 和溶洞 3 能量的进一步降低,其对靠近生产井井底的洞的物质补充能力逐渐降低,即溶洞 2 和溶洞 3 流入到裂缝的流量又逐渐变小 (图 4)。

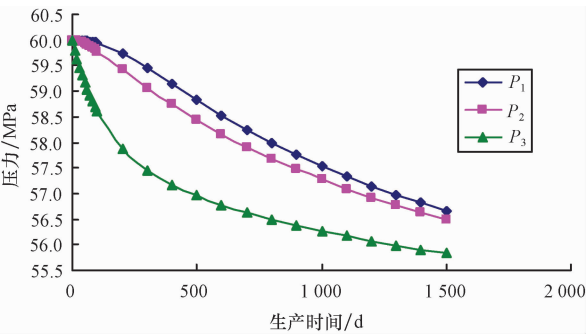


图 3 溶洞内压力随时间的变化规律

Fig. 3 Pressure changes with time in vugs

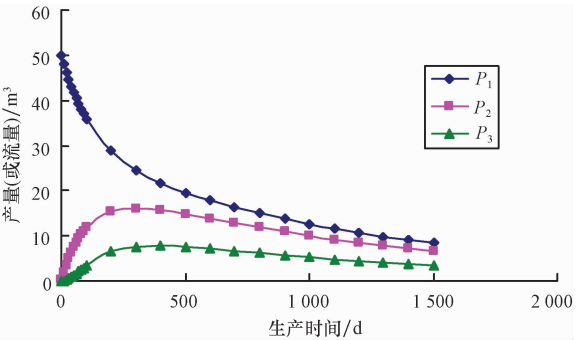


图 4 流量随时间的变化规律

Fig. 4 Flow rate changes with time