文章编号:1673-5005(2013)03-0115-04 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2013.03.020

基于压力恢复曲线的油井堵水决策技术

曲占庆[1], 张 杰[1], 齐 宁[1], 曲永林[2], 王 荣[3]

(1. 中国石油大学 石油工程学院,山东 青岛 266580; 2. 中国石油大港油田公司 石油工程研究院,天津 300280;
3. 中海油田服务股份有限公司 油田技术事业部,河北 廊坊 065201)

摘要:从渗流力学基础理论出发,利用压力恢复曲线,建立数学模型并推导出计算油井堵水的决策指数f_{PBD}的公式,在此基础上,结合影响堵水油井选择的含水上升率指数和剩余油饱和度两个因素,运用综合模糊评判方法求取油井堵水综合决策值,对需堵水的油井进行选择。对垦东 521 区块某小块 7 口油井进行堵水选井决策。结果表明:f_{PBD}与水相渗透率相关,可以作为堵水油井决策的依据;该决策选井方法考虑因素完善、数据易取、决策准确,与成功的经验选井方法得出结果吻合程度较高。

关键词:油井堵水; 压力恢复曲线; 决策指数; 综合决策; 模糊评判

中图分类号:TE 357 **文献标志码**:A

Decision-making technique of oil well water plugging based on pressure buildup curve

QU Zhan-qing[1], ZHANG Jie[1], QI Ning[1], QU Yong-lin[2], WANG Rong[3]

(1. *School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Production Technology Research Institute in Dagang Oilfield*, *PetroChina*, *Tianjin* 300280, *China*;
3. *Technique Department of China National Offshore Oilfield Service Corporation*, *Langfang* 065201, *China*)

Abstract: The mathematical model and decision-making index (f_{PBD}) of water shutoff can be established using the seepage mechanics theory and pressure buildup curve. The target wells were selected based on the f_{PBD} value, water cut rising index, remaining oil saturation and water shutoff comprehensive decision value obtained by fuzzy evaluation method. Seven production wells in KD521 block were chosen. The results show that f_{PBD} is related to water permeability, which can be considered as the foundation of water shutoff decision-making. The decision method of selecting well is characterized by taking into account all the factors, data easy to be obtained, and precise decision. The results agree well with that of experienced well selection method.

Key words: oil well water plugging; pressure buildup curve; decision-making index; comprehensive decision; fuzzy evaluation

堵水油井的选井大多是凭借经验,或是单靠油井含水率、剩余油饱和度等来决定[1-2]。油井压力恢复曲线在求取油井控制储量、求取地层参数、确定地层原始压力等方面的应用已趋于成熟,但是在堵水油井的选井决策方面还鲜有应用。笔者从渗流力学基础理论出发,利用压力恢复曲线,建立数学模型并推导出油井堵水的决策指数公式。

1 公式推导

Horner 提出的压力恢复试井分析计算方法[3]为

$$p_{ws}(t) = p_i - \frac{Q\mu}{4\pi kh}\ln\frac{T+t}{t} = p_i + m\lg\frac{t}{T+t}. \quad (1)$$

式中,$p_{ws}(t)$ 为关井 t 时刻的井底压力值,MPa;p_i 为

收稿日期:2012-12-03

基金项目:大型油气田及煤层气开发国家重大专项(2011ZX05051);中石化胜利油田分公司项目

作者简介:曲占庆(1963-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为油气田开发。E-mail:quzhq@hdpu.edu.cn。

井底压力,MPa;Q 为油井产量,cm^3/s;μ 为地下原油黏度,mPa·s;k 为油藏的绝对渗透率,μm^2;h 为油层有效厚度,cm;T 为油井稳定生产时间,s。

以 $p_{ws}(t)$ 为纵坐标,$\lg\frac{t}{T+t}$ 为横坐标,得到半对数 Horner 曲线,其斜率为 k,截距为 p_i。

根据 Perrine 理论[3-4],将单相流动基本微分方程中的流度一项用两相流流度之和代替,同时将单相流动基本微分方程中的压缩系数用有效弹性压缩系数来代替,修改后的基本微分方程可以用来描述两相流流动规律。

油井的稳定生产时间 T 不易确定[5-7]。当关井前生产时间较长,而关井时间相对较短时,可以用关井时刻井底压降值代替油井生产($T+t$)时间的井底压降值,从而得到考虑表皮效应时的井底压力公式:

$$p_{ws}(t)=p_{wf}(0)+\frac{Q\mu}{4\pi kh}\lg\frac{2.25\eta t}{r_w^2}=p_{wf}(0)+\frac{0.921\times10^{-3}qB}{\lambda_t h}\left(\ln t+\ln\frac{\lambda_t}{\varphi C_t r_w^2}+0.80907+2S\right)=p_{wf}(0)+k\left(\ln t+\ln\frac{\lambda_t}{\varphi C_t r_w^2}+0.80907+2S\right). \quad (2)$$

式中,$p_{wf}(0)$ 为关井瞬时井底压力,MPa;λ_t 为两相流体流度之和,$\mu m^2/(mPa\cdot s)$;φ 为油藏的孔隙度;C_t 为有效弹性压缩系数,MPa^{-1};r_w 为油井半径,cm;η 为导压系数,cm^2/s,$\eta=\frac{3.6\lambda_t}{\varphi C_t}$。

含水率公式:

$$f_w=\frac{q_w}{q_w+q_o}=\frac{-\frac{k_w}{\mu_w}A\frac{dp}{dx}}{\left(-\frac{k_w}{\mu_w}-\frac{k_o}{\mu_o}\right)A\frac{dp}{dx}}=\frac{1}{1+\frac{K_{ro}}{K_{rw}}\frac{\mu_w}{\mu_o}}. \quad (3)$$

式中,f_w 为含水率;q_w 和 q_o 分别为流过岩层渗流横截面积的水流量和油流量,m^3/d;k_w 和 k_o 分别为水相和油相有效渗透率,μm^2;μ_w 和 μ_o 分别为地层水和油的黏度,mPa·s;K_{rw} 和 K_{ro} 分别为水相和油相的相对渗透率。

由式(3)得出:

$$K_{ro}=\left(\frac{1}{f_w}-1\right)\frac{\mu_o}{\mu_w}K_{rw}. \quad (4)$$

1.1 油井决策指数 f_{PBD} 值定义及推导

f_{PBD} 值即压力恢复曲线决策指数。该值密切反映地层、流体的性质,可以通过油井压力恢复曲线结合地层参数求得。

$$k=\frac{0.921\times10^{-3}qB}{\lambda_t h}=\frac{0.92\times10^{-3}}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o}+\frac{K_{rw}}{\mu_w}\right)kh}. \quad (5)$$

将公式(4)代入公式(5),得

$$k=\frac{0.92\times10^{-3}}{\left(\frac{K_{ro}}{\mu_o}+\frac{K_{rw}}{\mu_w}\right)kh}=\frac{0.92\times10^{-3}}{\left(\frac{\left(\frac{1}{f_w}-1\right)\frac{\mu_o}{\mu_w}K_{rw}}{\mu_o}+\frac{K_{rw}}{\mu_w}\right)kh}=\frac{0.92\times10^{-3}qBf_w}{hk\frac{K_{rw}}{\mu_w}}=\frac{0.92\times10^{-3}qBf_w\mu_w}{hk_w}. \quad (6)$$

$$f_{PBD}=\frac{k}{f_w}=\frac{0.92\times10^{-3}qB\mu_w}{hk_w}. \quad (7)$$

式中,B 为体积系数。

f_{PBD} 与水相渗透率成反比,与地层有效厚度成反比,与水的流度反相关。利用 f_{PBD} 可以对需要堵水的油井进行选择。

1.2 根据压力恢复曲线求取 f_{PBD}

(1)根据现场油井的基础资料和油井关井后的实测压力恢复曲线,以 $p_{ws}(t)$ 为纵坐标,lg$t$ 为横坐标,绘制 $p_{ws}(t)$ ~ lg$t$ 关系曲线,即 MDH 曲线[8](图 1);

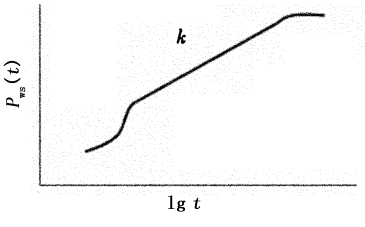


图 1 MDH 曲线

Fig. 1 Miller-Dyes-Hutchinso curve

(2)由 $p_{ws}(t)$ ~ lg$t$ 曲线,根据线性最小二乘理论,拟合出曲线的直线段关系式,得出直线段斜率 k;

(3)不考虑井筒储集效应时,$f_{PBD}=\frac{k}{f_w\ln10}$;

(4)求解 f_{PBD} 改正值。为了比较同一区块中各油井的 f_{PBD} 值,应将 f_{PBD} 修正至相同的产液强度(q/h)下,f_{PBD} 改正值($f_{PBD改}$)只与水相渗透率有关。

$$f_{PBD改}=\frac{f_{PBD}}{q/h}\times M. \quad (8)$$

式中,q 为油井产量,m^3/d;M 为区块产液强度平均值的就近归整值。

1.3 影响油井堵水的决策因素

(1)压力恢复决策指数 $f_{PBD改}$。$f_{PBD改}$ 与地层水相渗透率成反比,所以 $f_{PBD改}$ 越小,水相渗透率越大,相应的油井越需要堵水。

(2)剩余油饱和度 S_{or}。由组成油层的各个小

层的剩余油饱和度用各小层有效厚度占总厚度的百分数加权计算得出。S_{or} 越大,堵水成效越好[9-12]。

(3) 油井含水率上升指数 f_{WI}。由各油井的含水率随时间的变化曲线,运用计算软件进行定积分求解,如图 2 所示。f_{WI} 越大,越需要堵水。

油井含水率上升指数:

$$f_{WI} = \frac{\int_0^{t_M} f_w(t_M)\,\mathrm{d}t_M}{t_M}. \tag{9}$$

式中,$f_w(t_M)$ 为油井含水率随时间的变化函数;t_M 为时间。

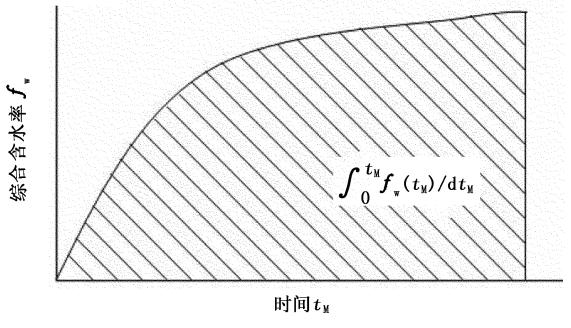


图 2　油井含水率随时间的变化曲线

Fig. 2　Curve of oil well moisture content varied with time

油井是否需要堵水,与上述三个参数密切相关,而三个参数之间又相互影响。为了实现堵水油井选择的综合决策,引入综合模糊评判方法[13],对上述三个决策参数进行综合模糊评判,得到综合决策值来进行判断需堵水的油井。

1.4　油井堵水的综合决策

(1) 建立因素集。因素集是影响被评判参数的各种因素所组成的一个集合,将影响堵水油井选择的三个因素构成一个集合,即因素集:

$$U = (f_{PBD改}, f_{WI}, S_{or}). \tag{8}$$

(2) 建立权重集。由于三个因素对于堵水油井选择的重要性不同,因此赋予不同的权重其对堵水油井选择影响的重要程度。由各因素的权重组成的集合即为权重集:

$$A = (a_i)_{i=1}^{n} = (a_1, a_2, \cdots, a_n). \tag{9}$$

式中,A 为权重集;a_i 为各因素相应的权重($i = 1,2,\cdots,n$,n 为整数)。

各因素相应的权重应满足:$\sum a_i = 1$,$a_i \geqslant 0$。

在堵水油井的选择中,含油饱和度 S_{or} 是油井堵水的前提,含水率上升指数 f_{WI} 关系到油井堵水的迫切程度,f_{PBD} 是堵水油井的选择的参考指标。故影响堵水油井选择的各因素的权重可选为:f_{PBD} 的权重为 0.20,f_{WI} 的权重为 0.35,S_{or} 的权重为 0.45。

(3) 建立评价集。单因素评价集为

$$R_i = (r_{ij})_{j=1}^{m} = (r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{im}). \tag{10}$$

其中,r_{ij} 为各评价因素的单因素评价值($i = 1,2,\cdots,n$,$j = 1,2,\cdots,m$)。

单因素评价矩阵为

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

综合评价集 $\boldsymbol{B}$ 是由权重集 $\boldsymbol{A}$ 与评价矩阵 $\boldsymbol{R}$ 相乘得到:

$$\boldsymbol{B} = (B_1, B_2, \cdots, B_m) = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{R} = (a_1, a_2, \cdots, a_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}. \tag{12}$$

式中,B_i 为各评价因素的综合评价值,即堵水油井的综合决策值。

油井的综合决策平均值 $\bar{B}$ 为

$$\bar{B} = \frac{\sum_{j=1}^{m} B_j}{m}. \tag{13}$$

建议选取综合决策值大于区块综合决策平均值 $\bar{B}$ 的油井进行堵水。将各井综合决策值进行排序,综合决策值越大的油井越需堵水。

2　应用实例

孤东油田垦东 521 块为孤东油田典型的边底水稠油油藏,采出程度低,采油速度低,综合含水率高。主要是由于该油藏边部受边底水影响油层压力高,而中部纯弹性降压开采压降大,边底水逐步向中部推进,水侵范围加大。孤东油田垦东 521 块分两套层系、两套井网进行开发,地质储量 575 万 t,截至 2009 年 12 月底,累积产油仅 58.79×10^4 t,采出程度仅为 10.55%,但综合含水率已高达 91.6%。选取该区块油井出水较严重的某小块进行堵水,应用该决策技术选出迫切需要堵水的油井并给出堵水迫切性顺序。

7 口油井关井后的实测压力恢复曲线如图 3 所示,各参数数据见表 1。

2-5X179 井的 f_{PBD} 过大,这是由于其产液量仅为 3.1 t/d,而其他 6 口井产液量均在 40 t/d 以上,2-

5X179 井产液量过小,其f_{PBD}及$f_{PBD改}$过大,这是由于该井供液不足,急需其他酸化、压裂等改善产液的措施,因此暂不将其考虑为堵水井范围之内。

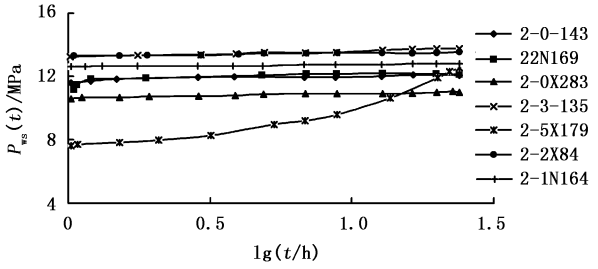


图 3 关井后油井 MDH 曲线

Fig. 3 MDH curve after oil well shutoff

表 1 各因素的评价值

Table 1 Evaluation value of various factors

井号	产液量 $q/(t \cdot d^{-1})$	有效厚度 h/m	f_{PBD}	$f_{PBD改}$	f_{WI}	S_{or}
2-0-143	60.5	1.9	0.0834	0.0254	0.783	0.30
22N169	40.0	6.5	0.2054	0.3376	0.802	0.44
2-0X283	43.8	8.3	0.0588	0.1106	0.645	0.29
2-3-135	84.2	5.6	0.1891	0.1323	0.618	0.32
2-5X179	3.1	5.5	0.9401	17.1409	0.551	0.27
2-2X84	53.0	10.8	0.0652	0.1381	0.783	0.30
2-1N164	68.2	11.2	0.0460	0.0740	0.814	0.33

通过计算可得各油井的综合决策值见表 2。

表 2 堵水油井的综合决策值

Table 2 Integrated decision value of water plugging oil well

井号	综合决策值
22N169	0.5462
2-1N164	0.4482
2-2X84	0.4367
2-0-143	0.4141
2-3-135	0.3868
2-0X283	0.3784

由表 2 可计算出综合决策平均值为 0.4350。可以看出,22N169 井的综合决策值最大,故该井最需要堵水,其次需要堵水的是 2-1N164 井和 2-2X84 井。根据该方法选出的需堵水油井与成功的经验选井方法相符程度较高,这与油田堵水选井的基本认识相吻合。

3 结 论

(1)利用油井压力恢复曲线推导出的油井堵水决策参数f_{PBD}值可以作为堵水油井选择的参考依据。

(2)以f_{PBD}值为基础,结合影响堵水油井选择的含水上升率指数和剩余油饱和度两个因素,运用综合模糊评判方法求取油井堵水综合决策值,可以对需堵水的油井进行选择。该决策方法与现场经验方法得出结果吻合程度较高。

参考文献:

[1] LIU Y, BAI B, SHULER P J. Application and development of chemical-based conformance control treatments in china oil fields[R]. SPE 99641, 2006.

[2] 王海静, 薛世峰, 高存法. 非均质油藏水平井射孔调剖方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2012, 36(3):135-139.
WANG Hai-jing, XUE Shi-feng, GAO Cun-fa. Profile control method for perforated horizontal wells in heterogeneous reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012,36(3):135-139.

[3] 卞晓冰, 张士诚, 马新仿. 考虑非达西流的低渗透油藏水力压裂优化研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(3):115-120.
BIAN Xiao-bing, ZHANG Shi-cheng, MA Xin-fang. Optimization of hydraulic fracturing considering non-Darcy flow in low permeability reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(3):115-120.

[4] PERRINE R L. Analysis of pressure buildup curve[C]// Dill and Pro Prac, API, 1956:482-509.

[5] 赵福麟. 压力指数决策技术及其应用进展[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011,35(1):82-86.
ZHAO Fu-lin. Pressure index decision-making technique and its application progresses[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(1):82-86.

[6] Der SARKISSIAN J, VENLINE M Prado, RAUSEO O. Lessons learned from four selective water-shutoff treatments in mature reservoirs in Maracaibo lake[R]. SPE 96528, 2005.

[7] 张建国, 雷光伦, 张艳玉. 油气层渗流力学[M]. 东营:石油大学出版社, 1997:109-112.

[8] 戴彩丽, 赵小明, 秦涛. 区块整体油井堵水的决策技术研究[J]. 断块油气田, 2006,13(4):21-23.
DAI Cai-li, ZHAO Xiao-ming, QIN Tao. Study on decision-making technique of oil well water shutoff in integral tract[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2006,13(4):21-23.

[9] 赵福麟, 戴彩丽, 王业飞. 油井堵水概念的内涵及其技术关键[J]. 石油学报, 2006,27(5):71-74.
ZHAO Fu-lin, DAI Cai-li, WANG Ye-fei. Comprehension of water shutoff in oil wells and its technical keys [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(5):71-74.

(下转第 125 页)