

文章编号: 100025870(2005) 0320070205

油、气、水三相水平井流入动态预测模型及其应用

董长银¹, 姬生柱², 王希涛²

(1. 中国石油大学石油工程学院 山东东营 257061; 2. 大庆油田有限公司第八采油厂, 黑龙江大庆 163000)

摘要: 目前关于水平井流入动态(IPR)的研究仅限于溶解气驱的情况, 还没有适合于油、气、水三相和整个油藏压力范围的水平井 IPR 模型。首先对现有的 4 种溶解气驱 IPR 方程进行了筛选, 以 Cheng 和刘想平的方程为基础, 建立了适用于油藏压力高于饱和压力的不含水组合适型水平井 IPR 模型。采用纯油与纯水 IPR 曲线加权平均得到综合 IPR 曲线的方法, 将组合适型 IPR 方程扩展到油、气、水三相的情况, 建立了适用于油、气、水三相和整个油藏压力范围的水平井 IPR 模型, 并对水平井流入动态预测计算方法进行了研究。利用该模型可以计算采液指数、产量和井底流压以及绘制 IPR 曲线等。模型及软件已应用于大庆肇州油田低渗水平井的流入动态预测, 效果良好。

关键词: 水平井; 流入动态; 预测模型; 油、气、水三相流; 采液指数

中图分类号: TE 355. 6 文献标识码: A

Inflow performance relationship prediction model for three phase flow of oil, gas and water in horizontal wells and its application

DONG Changyin¹, JI Shengzhu², WANG Xitao²

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;
2. The 8th Oil Production Plant of Daqing Oilfield Limited Company, Daqing 163000, China)

Abstract: The study of inflow performance relationship (IPR) is mainly focused on dissolved gas drive reservoirs, and there is no applicable horizontal IPR model for three phase flow of oil, gas and water and the whole reservoir pressure. In this work, based on Cheng and Liu's formulas, the two of four present IPR equations for horizontal wells in dissolved gas drive reservoirs, two assembled IPR models for horizontal wells with reservoir pressure higher than saturation pressure and water cut of zero were evolved. Then, by weighted average method, the composite IPR curve with water flow can be obtained from pure oil IPR curve and pure water IPR curve. The assembled IPR models without water flow were extended to be applicable to three phase flow of oil, gas and water. As a result, a new IPR model for horizontal wells with normal reservoir conditions was established, which can be used to calculate fluid productivity index, production rate and bottom hole flowing pressure and draw IPR curve. The model and the corresponding programs have been used to predict the horizontal well inflow performance in Zhaozhou Oilfield and the effect is excellent.

Key words: horizontal well; inflow performance relationship; prediction model; three phase flow of oil, gas and water; fluid productivity index

目前水平井流入动态的研究多集中在两个方面: 一是考虑各种表皮系数, 通过水平井产能公式计算流入动态^[1-8], 这种方法需要大量准确的地层参数, 实际应用较为困难; 二是通过生产数据回归流入动态关系^[9-11], 属于真正意义上的流入动态预测。后者通常是对溶解气驱油藏水平井的生产数据或数值模拟结果进行回归, 建立水平井流入动态方程, 这些方程仅适用于油藏压力低于饱和压力的油藏。而

对于非溶解气驱、已进入含水期的绝大多数油藏中的水平井, 尚缺乏可用的流入动态模型和预测计算方法。笔者通过筛选现有的溶解气驱水平井流入动态方程, 研究适用于油藏压力高于饱和压力情况的组合适型 IPR 方程, 并将其扩展到油、气、水三相的情况, 建立一套适用于油、气、水三相和整个油藏压力范围的水平井 IPR 模型和预测计算方法。

收稿日期: 2004- 12- 04

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(50274055); 石油工程学院青年教师基金资助课题

作者简介: 董长银(1976-), 男(汉族), 河南卫辉人, 讲师, 博士, 从事采油工程、固液两相流和油气井防砂方面的教学与科研工作。

1 溶解气驱水平井 IPR 方程

目前共有 4 种溶解气驱水平井 IPR 方程, 分别由 Cheng^[9]、Bendakhlia^[9]、刘想平^[10] 和黄炳光^[11] 提出。Bendakhlia 用两种三维三相黑油模拟器研究得到一种溶解气驱水平井的流入动态关系; 黄炳光将研究溶解气驱垂直井流入动态的方法用于水平井分析, 根据 Bendakhlia 的结果, 也得到一种相似的流入动态关系方程。由于方程本身数学形式的原因, 使用本文的研究方法无法利用 Bendakhlia 和黄炳光的方程进一步建立油、气、水三相的流入动态模型 (限于篇幅, 推导与证明过程从略)。因此本文中仅以其他两种方法为基础进行研究。

刘想平用黑油模拟器研究了溶解气驱油藏水平井的流入动态, 采用回归方法得到如下方程:

$$\frac{q_o}{q_{o\max}} = 1 - a \frac{p_{wf}}{p_r} - (1 - a)^2 \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 - a(1 - a) \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^3 \quad (1)$$

式中, q_o 为产油量, t/d; $q_{o\max}$ 为最大产油量, t/d; p_{wf} 为井底流压, MPa; p_r 为油藏压力, MPa; a 为待定参数, $0 \leq a \leq 1$ 。

Cheng 对溶解气驱油藏中斜井和水平井进行了数值模拟, 并用回归的方法得到了如下不同井斜角油井的 IPR 方程:

$$\frac{q_o}{q_{o\max}} = A - B \frac{p_{wf}}{p_r} - C \left(\frac{p_{wf}}{p_r} \right)^2 \quad (2)$$

式中, A, B, C 为井斜角的函数, 对于水平井, $A = 0.9885, B = -0.2055, C = 1.1818$ 。

方程(1), (2)均是从溶解气驱水平井的数值模拟结果回归而来, 因此仅能用于油藏压力低于饱和压力的溶解气驱油藏。

2 不含水组合型水平井 IPR 模型

2.1 以刘想平方程为基础的组合型 IPR 模型

图 1 为不含水组合型 IPR 曲线。在 $p_r > p_b$ 的油藏中, 当 $p_{wf} > p_b$ 时, 为单相流动, 采液指数为常数, IPR 曲线为直线, 此时的流入动态关系为

$$q_o = J(p_r - p_{wf}), q_b = J(p_r - p_b) \quad (3)$$

式中, J 为采液指数, t/(d#MPa); p_b 为饱和压力, MPa; q_b 为饱和压力 p_b 下的产量, t/d。

当 $p_{wf} < p_b$ 时, 为两相渗流, IPR 为曲线, 分别用 p_b, q_c 代替溶解气驱 IPR 方程(1)中的 $p_r, q_{o\max}$ 并进行产量叠加即可得到组合型 IPR 曲线上 $p_{wf} < p_b$ 时的关系方程:

$$q_o = q_b + q_c \left[1 - a \frac{p_{wf}}{p_b} - (1 - a)^2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 - a(1 - a) \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^3 \right] \quad (4)$$

其中

$$q_c = q_{o\max} - q_b$$

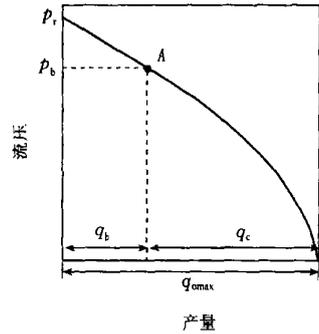


图 1 组合型 IPR 曲线

由于图 1 中 IPR 曲线在 A 点 ($p_{wf} = p_b$) 的连续性, 方程(3), (4)在 A 点的导数应相等。对方程(3), (4)分别求导并将 $p_{wf} = p_b$ 代入使二者相等得到

$$-J = q_c \left[-a \frac{1}{p_b} - 2(1 - a)^2 \frac{p_{wf}}{p_b^2} - 3a(1 - a) \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \frac{1}{p_b} \right] \Big|_{p_{wf} = p_b} \quad (5)$$

$$J = (2 - a^2) \frac{q_c}{p_b}, q_c = \frac{J p_b}{(2 - a^2)} \quad (6)$$

根据方程(4), 最后得到 $p_{wf} < p_b$ 时采液指数的表达式为

$$J = q_o \left\{ (p_r - p_b) + \frac{p_b}{2 - a^2} \left[1 - a \frac{p_{wf}}{p_b} - (1 - a)^2 \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 - a(1 - a) \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^3 \right] \right\}^{-1} \quad (7)$$

2.2 以 Cheng 方程为基础的组合型 IPR 模型

使用同样方法得到的以 Cheng 溶解气驱方程为基础的不含水组合型水平井 IPR 方程为

$$\begin{cases} q_o = J(p_r - p_{wf}), p_{wf} \geq p_b; \\ q_o = q_b + \frac{J p_b}{(B + 2C)} \left[A - B \frac{p_{wf}}{p_b} - C \left(\frac{p_{wf}}{p_b} \right)^2 \right], \\ p_{wf} < p_b. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} J = \frac{q_{o, \text{test}}}{p_r - p_{wf, \text{test}}}, p_{wf, \text{test}} \geq p_b; \\ J = q_{o, \text{test}} \left\{ (p_r - p_b) + \frac{p_b}{B + 2C} \left[A - B \frac{p_{wf, \text{test}}}{p_b} - C \left(\frac{p_{wf, \text{test}}}{p_b} \right)^2 \right] \right\}^{-1}, p_{wf, \text{test}} < p_b. \end{cases}$$

式中, $(q_{0, test}, p_{wf, test})$ 为产油量-流压测试点。

上述方程仅适用于不含水情况下油藏压力高于饱和压力的常规油藏的流入动态预测。

3 油、气、水三相水平井 IPR 模型

油、气、水三相水平井 IPR 模型的研究采用类似于 Petrobras 的油水加权平均法, 根据含水率取纯油和纯水 IPR 曲线的加权平均值, 得到综合 IPR 曲线, 如图 2 所示, 图中 q_{omax} , q_{tmax} , q_{wmax} 分别为最大产油量、产液量和产水量。

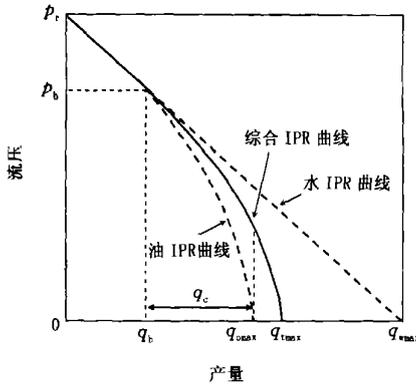


图 2 油、气、水三相 IPR 曲线

3.1 采液指数的计算

假设已知油藏压力 p_r 、饱和压力 p_b 和一个产油量-流压测试点 $(q_{t, test}, p_{wf, test})$ 。当 $p_{wf, test} > p_b$ 时,

$$J = \frac{q_{t, test}}{p_r - p_{wf, test}} \quad (9)$$

当 $p_{wf, test} < p_b$ 时, 纯油、纯水 IPR 曲线上的油、水产量分别为

$$q_o = q_b + q_c F, \quad q_w = J(p_r - p_{wf, test}) \quad (10)$$

其中

$$F = 1 - a \frac{p_{wf, test}}{p_b} - (1 - a)^2 \left(\frac{p_{wf, test}}{p_b} \right)^2 - a(1 - a) \left(\frac{p_{wf, test}}{p_b} \right)^3$$

式中, $q_{t, test}$ 为测试产液量, t/d; $p_{wf, test}$ 为与 $q_{t, test}$ 对应的井底流压, MPa; q_w 为纯水 IPR 曲线上的产水量, t/d。

综合 IPR 曲线上的产液量, 由油、水产量根据含水率 f_w 加权平均得到

$$q_{t, test} = q_o(1 - f_w) + q_w f_w = (1 - f_w) [q_b + q_c F] + f_w J(p_r - p_{wf, test}) \quad (11)$$

将方程 (3), (6) 代入方程 (11) 并求解, 得到 $p_{wf, test} < p_b$ 时采液指数 J 的表达式为

$$J = q_{t, test} \left\{ (1 - f_w) \left[p_r - p_b + \frac{p_b}{2 - a^2} F \right] + \right.$$

$$\left. f_w(p_r - p_{wf, test}) \right\}^{-1} \quad (12)$$

3.2 流压的计算

已知产液指数 J 后, 可以计算饱和压力下的产液量 q_b 。根据方程 (6) 和纯水 IPR 曲线特征, 得

$$\begin{cases} q_{wmax} = J p_r, \\ q_{omax} = q_b + \frac{J p_b}{2 - a^2}, \\ q_{tmax} = (1 - f_w) q_{omax} + f_w q_{wmax}. \end{cases} \quad (13)$$

当给定的产量 $q_t < q_b$ 时, 对应的井底流压为

$$p_{wf} = p_r - \frac{q_t}{J} \quad (14)$$

当 $q_b < q_t < q_{omax}$ 时, 由油相压力和水相压力根据含水率加权平均计算得到与 q_t 对应的井底流压。由方程 (10) 求解油相压力时无显式解, 需要采用二分法数值求解。表达式为

$$p_{wf, o} = f(a, p_b, q_{omax}, q_b, q_t) \quad (15)$$

式中, $p_{wf, o}$ 为油相压力, MPa。

纯水 IPR 曲线为直线, 产水指数恒定, 因此水相压力为

$$p_{wf, w} = p_r - \frac{q_t}{J}$$

式中, $p_{wf, w}$ 为水相压力, MPa。

根据含水率加权平均得到与 q_t 对应的井底流压为

$$p_{wf} = f_w \left(p_r - \frac{q_t}{J} \right) + (1 - f_w) p_{wf, o} \quad (16)$$

当 $q_{omax} < q_t < q_{tmax}$ 时, 图 2 中纯油 IPR 曲线消失, 无法使用油水加权平均法计算综合 IPR 曲线, 可将此区间中的综合 IPR 曲线近似为一直线段, 其斜率近似为 $[q_b, q_{omax}]$ 区间上的综合 IPR 曲线在 q_{omax} 处的斜率 $\left. \frac{dp_{wf}}{dq_t} \right|_{q_t = q_{omax}}$, 对方程 (16) 求导并将 $q_t = q_{omax}$ 代入可计算该斜率。

当 $q_t > q_{omax}$ 时, q_t 对应的井底流压可根据线性关系计算, 即

$$p_{wf} = p_{wf} \Big|_{q_t = q_{omax}} + (q_t - q_{omax}) \left. \frac{dp_{wf}}{dq_t} \right|_{q_t = q_{omax}} \quad (17)$$

方程 (9), (12~14), (16), (17) 组成以刘想平溶解气驱方程为基础的油、气、水三相水平井 IPR 模型。用同样的方法可得到以 Cheng 方程为基础的油、气、水三相水平井 IPR 模型。表达式为

$$\begin{cases} J = \frac{q_{t, \text{test}}}{p_r - p_{w f, \text{test}}}, p_{w f, \text{test}} \setminus p_b; \\ J = q_{t, \text{test}} \left\{ (1 - f_w) \left[p_r - p_b + \frac{p_b}{(B + 2C)} F \right] + \right. \\ \left. f_w (p_r - p_{w f, \text{test}}) \right\}^{-1}, p_{w f, \text{test}} < p_b. \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} p_{w f} = p_r - \frac{q_t}{J}, q_t [q_b; \\ p_{w f} = f_w \left[p_r - \frac{q_t}{J} \right] + (1 - f_w) p_b @ \\ \left[- \frac{B}{2C} + \frac{1}{2C} \sqrt{B^2 + 4AC - 4C \frac{q_t - q_b}{q_{o \max} - q_b}} \right], \\ q_b < q_t < q_{o \max}; \\ p_{w f} = f_w \left[p_r - \frac{q_{o \max}}{J} \right] + (1 - f_w) p_b @ \\ \left[- \frac{B + \sqrt{B^2 + 4AC - 4C}}{2C} \right] + (q_t - q_{o \max}) @ \\ \left[- \frac{f_w}{J} - \frac{(1 - f_w)(B + 2C)}{J \sqrt{B^2 + 4AC - 4C}} \right], \\ q_{o \max} < q_t < q_{t \max}. \end{cases} \quad (19)$$

4 流入动态预测计算方法

4.1 以刘想方程为基础的水平井流入动态预测
使用以刘想方程为基础的油、气、水三相水平井流入动态模型进行流入动态预测, 绘制 IPR 曲线时, 必须首先确定待定系数 a 和计算采液指数 J。待定系数 a 的计算至少需要两组测点数据。假设已知油层静压 p_r 和两组测点 $(q_{t1}, p_{wf1}), (q_{t2}, p_{wf2})$ 。

若只有一个测点在饱和压力之上, 即 $p_{wf1} > p_b, p_{wf2} < p_b$, 则使用测点 (p_{wf1}, q_{t1}) 计算产液指数

$$J = \frac{q_{t1}}{p_r - p_{wf1}}$$

然后用另外一个低于饱和压力的测点 (q_{t2}, p_{wf2}) 计算待定系数 a。

若两个测点均位于饱和压力以下, 即 $p_{wf1} < p_b, p_{wf2} < p_b$, 则将两个测点分别代入方程 (12) 并求解可得到采液指数 J 和参数 a。实际上仅用两个测点计算得到的参数 a 的准确性较差, 使用多个测点数据进行非线性回归的结果才比较可靠^[10]。利用方程 (14), (16), (17) 设定一组产量, 可计算相应的井底流压, 从而绘制 IPR 曲线。

4.2 以 Cheng 方程为基础的水平井流入动态预测

4.2.1 油藏压力的计算

假设油藏压力未知, 两个测试点的井底流压都高于饱和压力 p_b , 则油藏压力可由两个测点计算,

$$p_r = - q_{t1} \frac{p_{wf1} - p_{wf2}}{q_{t1} - q_{t2}} + p_{wf1}$$

若 $p_{wf1} > p_b, p_{wf2} < p_b$, 则油藏压力计算公式为

$$p_r = \left[(1 - f_w) \left[- p_b + \frac{p_b F}{B + 2C} \right] - f_w p_{wf2} + p_{wf1} \frac{q_{t2}}{q_{t1}} \right] \left[\frac{q_{t2}}{q_{t1}} - 1 \right]^{-1}$$

其中

$$F = A - B \left[\frac{p_{wf2}}{p_b} \right] - C \left[\frac{p_{wf2}}{p_b} \right]^2$$

若 $p_{wf1} < p_b, p_{wf2} < p_b$, 则油藏压力计算公式为

$$p_r = \left[q_{t2} (1 - f_w) \left[- p_b + \frac{p_b F_1}{B + 2C} \right] - f_w q_{t2} p_{wf1} + p_{wf1} \frac{q_{t2}}{q_{t1}} - q_{t1} (1 - f_w) \left[- p_b + \frac{p_b F_2}{B + 2C} \right] + f_w q_{t1} p_{wf2} \right] (q_{t1} - q_{t2})^{-1}$$

其中

$$F_1 = A - B \left[\frac{p_{wf1}}{p_b} \right] - C \left[\frac{p_{wf1}}{p_b} \right]^2, \\ F_2 = A - B \left[\frac{p_{wf2}}{p_b} \right] - C \left[\frac{p_{wf2}}{p_b} \right]^2$$

4.2.2 流入动态预测

计算得到油藏压力 p_r 后, 使用一个测点, 根据其井底流压与饱和压力的关系, 在方程 (18) 中选用相应的公式计算采液指数 J; 然后设定一组产量, 使用方程 (19) 可计算相应的井底流压, 进而绘制水平井 IPR 曲线。

需要注意的是, 油井实际生产数据由于各种原因往往波动比较大, 某一个测点并不能真实反映水平井的生产状况, 因此为了得到更加准确的流入动态曲线, 推荐使用一段生产时间内的平均值作为测点, 进行流入动态的预测。

5 实例计算

大庆葡萄花油藏为低渗透油藏, 州 662 平 61 井为水平井, 水平段垂深 1397 m, 水平段长 594.2 m, 于 2003 年 1 月投产, 油层压力为 10.82 MPa, 下泵深度为 1200 m。从投产到 2003 年 8 月每月的平均生产数据见表 1。

由于该水平井产量下降较快, 生产状况在较长时间内不稳定, 使用以刘想方程为基础的流入动态模型时, 待定参数 a 的回归比较困难, 因此采用以 Cheng 方程为基础的油、气、水三相水平井流入动态模型对该井进行流入动态计算。

表1 州62平61井生产月报

月份	动液面 D _l /m	产液量 q _l /(t·d ⁻¹)	含水率 f _w /%	流压 p _{wf} /MPa
1	1151.0	18.98	2.50	2.19
2	1149.75	12.92	4.15	2.20
3	1160.3	7.18	4.64	2.11
4	1162.0	5.91	5.55	2.10
5	1157.0	5.20	0.84	2.13
6	1157.0	4.60	5.00	2.14
7	1157.0	4.30	6.03	2.14
8	1186.6	2.77	14.34	1.93

将每月的生产数据视为一个产量-流压测点, 计算得到如图3所示的1, 3, 6, 8月份的流入动态曲线。

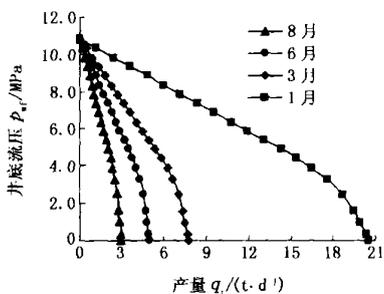


图3 州62平61井IPR曲线

图4为计算得到的该井2003年1~8月的产液指数变化曲线。由于该井所处的葡萄油层为低渗、薄油层, 因此产量下降较快。

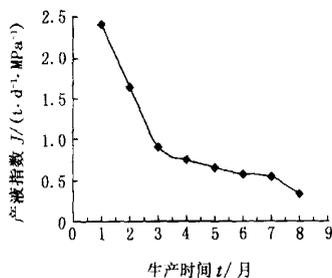


图4 州62平61井产液指数变化

根据模型编写的计算软件已应用于大庆肇州油田葡萄油层11口水平井的流入动态预测, 对油井工作制度的制定起到了很好的指导作用。目前IPR模型和软件应用效果良好。

参考文献:

[1] ARCHER R A, AGBONGIATOR E O. Correcting for fictitious pressure drop in horizontal well inflow performance relationships[R]. SPE 80528, 2003.

[2] 赵仁宝. 溶解气驱油藏中斜井和水平井流入动态[J]. 国外油田工程, 1994, 10(1): 15- 18.

ZHAO Renbao. Inflow performance of deviated and horizontal wells in dissolved gas drive reservoir[J]. Foreign Oil Field Engineering, 1994, 10(1): 15- 18.

[3] 刘慧卿, 陈月明, 杜殿发, 等. 蒸汽吞吐水平井热流体流入动态研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(增刊): 81- 83.

LIU Huqing, CHEN Yueming, DU Dianfa, et al. Research on the inflow performance of steamsoaking horizontal wells[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1994, 18(Sup): 81 - 83.

[4] 杨道永, 张琪, 樊灵, 等. 裂缝性油藏水平井流入动态研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1999, 23(6): 44- 49.

YANG Daoyong, ZHANG Qi, FAN Ling, et al. Inflow performance of horizontal wells in naturally fractured reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1999, 23(6): 44 - 49.

[5] 李笑萍, 赵天奉. 考虑变质量湍流影响的水平井流入动态分析[J]. 石油学报, 2002, 23(6): 63- 67.

LI Xiaoping, ZHAO Tianfeng. Inflow performance analysis on horizontal wellbore with changing quality turbulence effect[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 63- 67.

[6] THOMAS L K, TODD B J, EVANS C E, et al. Horizontal well IPR calculation[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1998, 1(5): 392- 399.

[7] PERMADI P, WIBOWO W. Effects of nonuniform skin distribution on horizontal well inflow performance[R]. SPE 68952, 2001.

[8] YILDIZ T. Inflow performance relationship for perforated horizontal wells[R]. SPE 67233, 2001.

[9] 张琪. 采油工程原理与设计[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000. 14- 15.

[10] 刘想平, 蒋志祥, 刘翔鹤, 等. 溶解气驱油藏水平井无因次IPR曲线的新相关式及其应用[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(1): 61- 63.

LIU Xianping, JIANG Zhixiang, LIU Xianghe, et al. A new correlation of dimensionless inflow performance relationships in horizontal wells in dissolved gas drive reservoir and its application[J]. China Offshore Oil and Gas(Geology), 2000, 14(1): 61- 63.

[11] 黄炳光, 李顺初, 周荣辉. IPR曲线在水平井动态分析中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(5): 56- 58.

HUANG Bingguang, LI Shunchu, ZHOU Ronghui. An application of IPR curves in the production behavior analysis of a horizontal well[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(5): 56- 58.

(编辑 李志芬)