

文章编号:1673-5005(2011)05-0089-05

基于无因次压降曲线的注水优势流动通道识别方法

谷建伟^{1,2}, 张秀梅¹, 郑家朋^{2,3}, 樊兆亚¹

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石油大学 石油工程学院, 北京 102249;
3. 中国石油冀东油田分公司 钻采工艺研究院, 河北 唐山 063004)

摘要:根据试井基本理论,推导无因次井底压降表达公式,以冀东南堡陆地中浅层油藏资料为基础,建立典型井组数值概念模型,计算分析 7 个渗透率范围 10 种渗透率差异倍数下的无因次压降图版。理论分析和数值概念模型计算均表明:采用无因次压降可以消除注水量、吸水地层厚度、地层压力等参数对井底压降特征的影响;在研究区块油藏条件下,当渗透率差异超过 6 倍后,可形成优势流动通道。

关键词:冀东南堡油田; 井口压降曲线; 无因次井底压降; 图版; 优势流动通道; 渗透率差异倍数

中图分类号:TE 357.7 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2011.05.016

Method of recognizing preferred water flow channels with dimensionless pressure drop curve

GU Jian-wei^{1,2}, ZHANG Xiu-mei¹, ZHENG Jia-peng^{2,3}, FAN Zhao-ya¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;

2. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Drilling and Production Technology Research Institute of Jidong Oilfield Branch, PetroChina, Tangshan 063004, China)

Abstract: Based on fundamental well test theory, the formula of dimensionless bottom hole pressure drop was derived. With the information of shallow reservoir in Jidong Oilfield, the numerical concept model of well groups was established. The dimensionless pressure drop plate under seven different permeability ranges and ten permeability difference coefficients were calculated and analyzed. The theoretical analysis and numerical concept model calculation results show that the dimensionless pressure drop can eliminate the effects of injection water volume, thick of water absorption lay, formation pressure on the bottom hole pressure drop. Under the studied reservoir conditions, the preferred water flow channels form when the permeability difference coefficient is greater than 6.

Key words: Jidong Nanpu Oilfield; wellhead pressure drop curve; dimensionless bottom-hole pressure drop; plate; preferred water flow channel; permeability difference coefficient

疏松砂岩油藏经过长期注水开发后,容易在油藏平面及纵向上形成优势流动通道,导致注入水在注采井间窜流突进,降低波及系数,因此治理优势流动通道对开发高含水油田非常重要^[1]。治理优势流动通道的首要工作是识别地层中的优势流动通道。目前识别方法较多,如井间示踪剂测试法^[2]、吸水剖面测试法^[3]、试井解释法^[4]、油藏工程综合分析法^[5]、双对数压降曲线法^[6]等。这些识别方法

所依据的理论、识别方法各不相同,在实际矿场中都有所应用。史有刚等^[6]采用试井解释模型对优势流动通道进行了识别^[6];刘立明等^[7]建立了油水两相流压降数值试井模型。以上识别优势流动通道的方法理论性强,但是需要花费很大精力进行矿场资料的测取、解释,成本较高。如何采用矿场上来源广、获取方便的资料进行优势流动通道识别是一个迫切需要解决的问题。矿场上注水井井口压降曲线

是一种非常容易获取的资料。调剖 PI 决策理论^[8]就是以井口压降曲线为主要数据来源的决策方法, 经过长期发展井口压降曲线也逐渐用来进行注水井优势流动通道识别。矿场上, 当发现某口注水井井口压降曲线下降较快, 即认定该口注水井周围存在优势流动通道, 这种识别方法存在如下问题: ① 根据曲线下降速度进行综合对比确定优势流动通道缺乏理论根据; ② 如果同一油藏中所有注水井的井口压降曲线下降都比较快, 那么采用这种判断方法只能优选出部分存在优势流动通道的注入井, 容易造成漏判; ③ 井口压降曲线下降速度受注水井注水量、吸水地层厚度、地层压力、地层渗透率等多种因素影响, 造成多解性严重。针对以上问题, 笔者首先引用无因次压降曲线概念, 消除部分参数的影响, 进而利用冀东南堡陆地中浅层油藏资料绘制无因次压降曲线标准图版, 并进行矿场应用识别。

1 注水井无因次压降曲线识别优势流动通道的理论基础

1.1 注水井井底无因次压降的理论推导

处于高含水开发期的油田, 注水井井底附近的流体主要为注入水, 注入水已经在地层中形成了稳定的流动通道, 因此注水井井底压力计算可以主要考虑水相流动。假设一个处于高含水开发期的油藏, 在无注入采出情况下经过长时间恢复后平均地层压力为 p_i , 从某时刻开始, 一口注水井以恒定注水量 q_w 进行注水, 经过 t 时间后, 注水井井底的压力^[9]为

$$p_{wf}(t) = p_i + \frac{2.121 \times 10^{-3} q_w \mu_w B_w}{kh_w} \times \left(\lg \frac{kt}{\varphi \mu_w C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S \right). \quad (1)$$

式中, $p_{wf}(t)$ 为注水井井底流动压力, MPa; q_w 为注水井注水量, m^3/d ; μ_w 为注入水黏度, $mPa \cdot s$; k 为地层渗透率, μm^2 ; B_w 为注入水体积系数; C_t 为流体综合压缩系数, MPa^{-1} ; φ 为地层孔隙度; t 为注水井注入时间, h ; h_w 为吸水地层厚度, m ; r_w 为注水井井底半径, m ; S 为表皮系数。

注水井以恒定注入量注水 t 时间后, 关井测量井底压力。关井后井底压力变化^[9]表达式为

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i + \frac{2.121 \times 10^{-3} q_w \mu_w B_w}{kh_w} \lg \left(\frac{t+\Delta t}{\Delta t} \right). \quad (2)$$

式中, $p_{ws}(\Delta t)$ 为关井 Δt 时间后井底压力, MPa(关井时间 $\Delta t=0$ 时的井底压力 $p_{ws}(\Delta t=0)$ 即注水井注水

t 时间时的井底压力 $p_{wf}(t)$)。

从式(2)可以看出, 注水井关井后井底压力受到关井前注水量、渗透率、吸水地层厚度、平均地层压力、关井时间、流体黏度等参数影响, 尤其是注水量和吸水地层厚度两个参数影响最大。矿场上, 每口注水井的注水量和吸水地层厚度各不相同, 造成关井后井底压力、井口压力变化各不相同。如果直接采用井底或者井口压降曲线来判断是否存在优势流动通道, 势必造成多解。为了减少压降曲线的影响参数, 采用无因次井底压降来判断优势流动通道。无因次井底压降 $\Delta p'_{wf}(\Delta t)$ 定义为关井后井底压力 $p_{ws}(\Delta t)$ 与平均地层压力 p_i 之差除以注水井关井前注水压差($p_{wf}(t)-p_i$), 利用式(1)、(2)可以得到无因次井底压降的表达式为

$$\Delta p'_{wf}(\Delta t) = \frac{p_{ws}(\Delta t) - p_i}{p_{wf}(t) - p_i} = \frac{\lg \frac{kt}{\varphi \mu_w C_t r_w^2} + 0.9077 + 0.8686S}{\lg \left(\frac{t+\Delta t}{\Delta t} \right)}. \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 无因次井底压降已经与注水量、吸水地层厚度、地层平均压力没有关系, 只与渗透率、关井时间及油藏岩石和流体性质参数有关, 在这些参数中, 影响最大的是关井时间和地层渗透率, 其余参数对于同一个油藏基本相近。在关井测量时间相同条件下, 地层渗透率直接影响了无因次压降曲线特征。矿场上, 经过长期注水开发, 优势流动通道地层的渗透率要明显高于非优势流动通道地层渗透率, 因此对于存在优势流动通道的注水井, 其无因次井底压降曲线也会表现出相应特征。

1.2 注水井井底压降与井口压降的关系

矿场上可以比较方便地测量注水井关井后井口压降曲线, 而测量井底压降变化则比较麻烦, 因此还需要研究井口压降与井底压降之间的关系。当注水井注水时, 可以根据井口压力、摩阻数据、地层深度计算出井底压力^[10], 表达式为

$$p_{wf}(t) = p_i(t) + \rho gh - \lambda \frac{\rho v^2}{2D}. \quad (4)$$

当注水井关井后, 可以根据井口压力和地层深度计算出井底压力^[11], 表达式为

$$p_{ws}(\Delta t) = p_i(\Delta t) + \rho gh. \quad (5)$$

平均地层压力与静水柱压力之间的关系为

$$p_i = \rho gh + \Delta p_i. \quad (6)$$

式中, $p_i(t)$ 为注水时井口压力, Pa; $p_i(\Delta t)$ 为关井 Δt 时间井口压力, Pa; Δp_i 为地层平均压力与油藏净水

柱压力之差,Pa; ρ 为注入水密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为从井口到吸水层位的垂直井深, m ; λ 为摩阻系数; v 为体积流速, m/s ; D 为注水管柱内径, m 。

根据无因次井底压降定义,得

$$\Delta p'_{wf}(\Delta t) = \frac{p_{ws}(\Delta t) - p_i}{p_{wf}(t) - p_i} = \frac{p_t(\Delta t) - \Delta p_i}{p_t(t) - \frac{\lambda \rho v^2 h}{2D} - \Delta p_i}. \quad (7)$$

式(7)表明,可以采用井口压力测量数据、地层压力数据和注水量等参数来计算无因次井底压降。此外,在式(3)中采用无因次井底压降形式消除了注水量、吸水地层厚度和地层压力的影响,但是采用式(7)后,无因次压降表达形式中考虑到了注水量、地层压力等参数。这种表达形式达到了两个目的:一是井口压力、注水量和地层压力数据都容易获取,计算比较容易;二是通过以上计算公式可以实现对单独1口井的判断,而不是进行油藏内所有注水井的比较,判断方法更加量化。

采用无因次井底压降曲线识别注水优势流动通道的思路为:首先采用理论方法计算无因次井底压降曲线,然后采用井口压力测试等资料计算实测的无因次井底压降曲线,最后将两种无因次压降曲线进行拟合对比,判断是否存在优势流动通道。

2 注水井无因次压降曲线图版的建立

在高含水开发期,影响无因次压降的因素很多,解析方法求解难度很大,但是可以采用数值概念模型的计算方法(采用软件为 Eclipse)。

2.1 概念模型的建立

以五点法井网为例,建立数值模拟概念模型。为了适应注水井井底流动规律,采用柱坐标网格系统。概念模型中的流体参数、相渗参数、油藏物性参数取值于冀东南堡陆地中浅层油藏。由于需要描述井底压力在短时间内的变化规律,计算过程中采用了实验室单位制,可以计算分钟层次的井底压力变化。在概念模型基础上,首先模拟注水开发过程,一直计算到高含水开发期,模拟目前南堡中浅层油藏的开发状况。在此基础上计算注水井关井后井底压力变化特征。

不同注水强度下井底压降曲线见图1。图1表明,随注水强度增加,注水井井底压力逐渐上升,可见注水强度对有因次井底压降影响较大。采用无因次压降后,不同注水强度下的无因次压降曲线基本重合,无因次化后可以消除注水量、吸水地层厚度等

因素对压降曲线的影响。

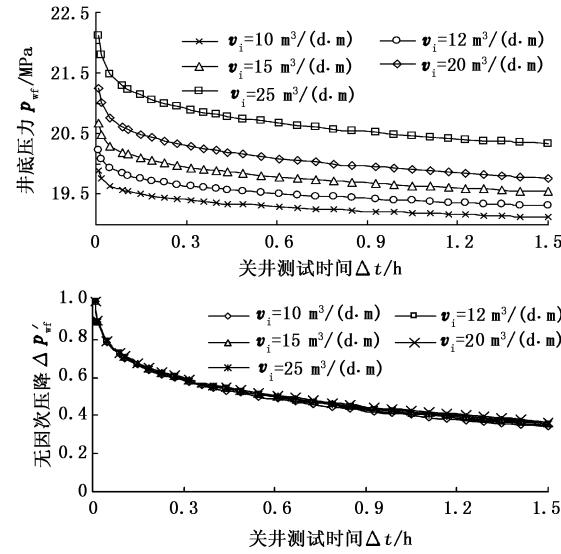


图1 不同注水强度下注水井井底压降曲线

Fig. 1 Bottom-hole pressure drop curves of injection wells in different water injection intensity

2.2 具有优势流动通道的注水井无因次压降曲线

利用数值概念模型计算当地层中存在优势流动通道时的特征曲线。模型中假设地层由两部分构成,一部分是非优势流动通道地层,另一部分是优势流动通道地层。定义优势流动通道地层的渗透率和非优势流动通道地层渗透率的比值为渗透率差异倍数。不同渗透率差异倍数(1倍时为均质地层,两部分地层的渗透率相同)下的无因次井底压降曲线见图2。

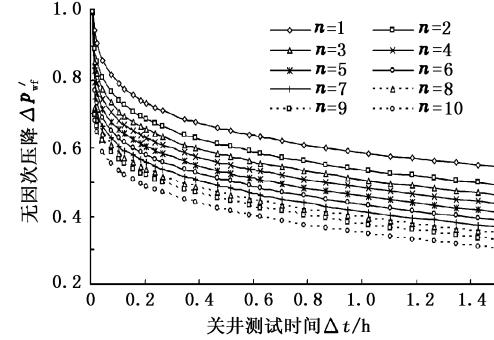


图2 优势流动通道不同渗透率差异倍数下无因次压降图版

Fig. 2 Dimensionless pressure drop plate of predominant flow channel for different permeability difference coefficient

从图2可以看出,随渗透率差异倍数增加,初期压降迅速降低,后期曲线逐渐平缓。统计曲线两个特征参数,一是1.5 h(测试结束时刻,一般矿场上往往只测量90 min内的井口压降数值)时无因次压降数值,二是无因次压降达到0.5所需的时间,结果

见图 3。

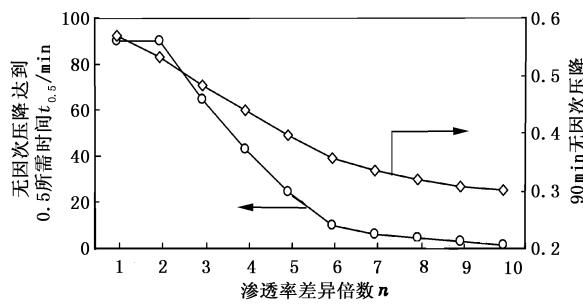


图 3 无因次压降曲线特征参数变化

Fig. 3 Variation of characteristic parameters in dimensionless pressure drop curve

从特征参数的变化趋势看,随渗透率差异倍数增加,90 min 无因次压降数值逐渐降低,即优势流动通道渗透率越高,注水井井底压力在相同时间内下降得越低;无因次压降达到 0.5 时所用的时间也越短。

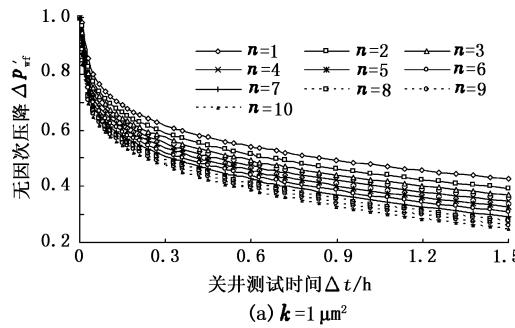


图 4 非优势流动通道无因次压降图版

Fig. 4 Dimensionless pressure drop plate of non-dominant flow channel

3 注水井无因次压降曲线图版的应用

在得到一系列图版后,可以利用矿场实测的井口压降曲线判断是否存在优势流动通道。具体的应用步骤为:①首先收集整理井口测试数据;②利用 Δp_i 、摩阻数据和井口压降测试数据计算实测无因次井底压降曲线;③将实测无因次压降曲线数据绘制到相应渗透率的标准图版中;④拟合实测无因次曲线与标准图版曲线对应状况,如果对应图版曲线渗透率差异超过 6 倍,则可以判断存在优势流动通道。

注水井 G37-2 井井深 1.93 km,非优势通道渗透率为 $2.892 \mu\text{m}^2$,因此选用 $3 \mu\text{m}^2$ 的图版。经测试目前该井组平均地层压力为 18.7 MPa,油藏净水柱压力为 19.3 MPa, Δp_i 为 -0.6 MPa;摩阻计算结果为 0.3 MPa。2009 年 8 月 23 日该井测量井口压降曲线如图 5(a)所示。关井后井口压力迅速降低,在测量到 39 min 后,井口压降即将为 0 MPa。对该实测曲线进行无因次化处理,并将得到的无因次压

图 3 曲线特征表明,在渗透率差异倍数小于 6 时,无因次压降达到 0.5 所用时间下降迅速,而超过 6 以后,达到无因次压降 0.5 所用的时间已经非常少,而且变化缓慢。根据该特征,可以认为在南堡中浅层油藏条件下,当渗透率差异超过 6 倍后可形成优势流动通道。

2.3 不同地层渗透率下无因次图版的建立

无因次井底压降曲线不仅与渗透率差异倍数有关,也与地层渗透率密切相关。采用概念模型,根据冀东南堡陆地中浅层油藏情况,计算非优势流动通道地层渗透率为 $0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5 \mu\text{m}^2$ 等 7 种情况下的无因次压降图版。以渗透率为 $1 \mu\text{m}^2$ 和 $3 \mu\text{m}^2$ (图 4)为例进行说明。

从图 4 中可以看出,随渗透率差异倍数增加,无因次压降下降加快。不同非优势流动通道渗透率下的无因次压降图版下降规律也不同。

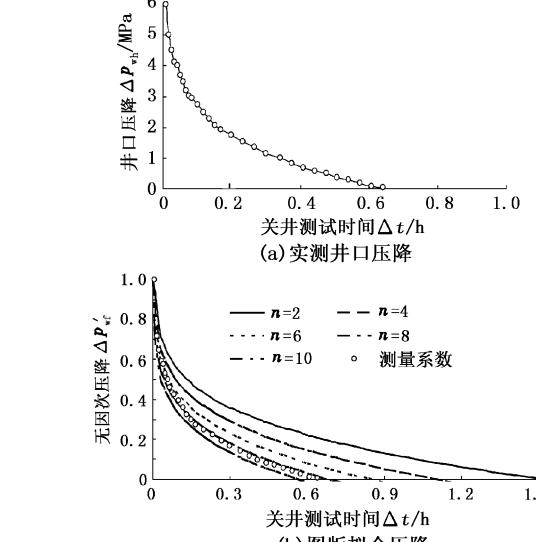
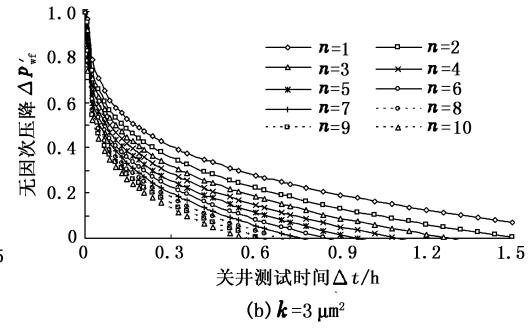


图 5 G37-2 井实测井口压降和无因次压降图版拟合

Fig. 5 Dimensionless pressure drop plate matching for well G37-2

降曲线绘制到相应的标准图版中,见图5(b)。从图5中可以看出,实测无因次压降曲线与8倍曲线拟合较好,该数值超过6倍,可以判断地层中出现优势流动通道。

采用该种方法,对冀东油区的多口注水井进行了优势流动通道判断,共分析67井次,判断存在优势流动通道的注水井35井次,经示踪剂等其他方法验证属实的31井次,有效率为88.6%。

4 结 论

(1)采用注水井井底无因次压降可以消除注水量、吸水地层厚度、地层压力等参数对井底压降曲线变化特征的影响,便于实现对每口注入井进行优势通道判断。

(2)采用南堡陆地中浅层油藏特征,计算了多种渗透率条件下的井底无因次压降曲线,并进行特征参数分析,在南堡中浅层油藏条件下,当渗透率差异超过6倍后即可形成优势流动通道。

(3)建立的无因次压降图版可以方便可靠地识别注入井优势流动通道。

参考文献:

- [1] 赵福麟.油井选择性堵水[J].中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(1):84-90.
ZHAO Fu-lin. Selective water shutoff for oil well [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(1):84-90.
- [2] 窦之林,曾流芳,张志海,等.大孔道诊断和描述技术研究[J].石油勘探与开发,2001,28(1):75-77.
DOU Zhi-lin, ZENG Liu-fang, ZHANG Zhi-hai, et al. Research on the diagnosis and description of wormhole [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28 (1):75-77.
- [3] 刘月田,孙保利,于永生.大孔道模糊识别与定量计算方法[J].石油钻采工艺,2003,25(5):54-59.
LIU Yue-tian, SUN Bao-li , YU Yong-sheng. Fuzzy identification and quantitative calculation method for big pore throat [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25 (5):54-59.
- [4] 张静,杨欢.试井解释地层大孔道技术研究[J].长江大学学报:自然科学版,2010,7(3):533-535.
ZHANG Jing, YANG Huan. The technical research of well test interpretation on macropore path in layers [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2010,7(3):533-535.
- [5] 毛振强,谷建伟,董平志.疏松砂岩油藏大孔道形成机理与预测[J].油气地质与采收率,2011,18(1):77-79.
MAO Zhen-qiang, GU Jian-wei, DONG Ping-zhi. Study on occurrence mechanism and prediction of big channels in loose cemented sandstone reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011,18(1):77-79.
- [6] 史有刚,曾庆辉,周晓俊.大孔道试井理论解释模型[J].石油钻采工艺,2003,25(3):48-50.
SHI You-gang, ZENG Qing-hui, ZHOU Xiao-jun. Interpreting model of large pore well testing theory [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003,25(3):48-50.
- [7] 刘立明,陈钦雷,王光辉.油水两相渗流压降数值试井模型的建立[J].石油大学学报:自然科学版,2001,25 (2):42-45.
LIU Li-ming, CHEN Qin-lei, WANG Guang-hui. Construction of numerical pressure drop models for oil water flow [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001,25(2):42-45.
- [8] 何长,李平,汪正勇,等.大孔道的表现特征及调剖对策[J].石油钻采工艺,2000,22(5):32-38.
HE Chang, LI Ping, WANG Zheng-yong, et al. The characteristic of large pore path in Gudao Oilfield and its profile control or plugging method [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2000,22(5):32-38.
- [9] 姜汉桥,姚军,姜瑞忠.油藏工程原理与方法[M].东营:中国石油大学出版社,2006:128-148.
- [10] 张琪.采油工程原理与设计[M].东营:石油大学出版社,2000:41-49.
- [11] 张建国,雷光伦,张艳玉.油气层渗流力学[M].东营:中国石油大学出版社,2006:2-5.

(编辑 李志芬)