

高探 1 井储层评价与产能分析

陈超峰¹, 孙刚², 毛新军¹, 胡广文³, 封猛³, 咸玉席²

- 1. 中国石油新疆油田分公司勘探事业部 新疆克拉玛依 834000
- 2. 中国科学技术大学石油天然气研究中心 安徽合肥 230022
- 3. 中国石油天然气集团公司西部钻探工程有限公司试油公司 新疆克拉玛依 834000

通讯作者:Email:yxxian@ustc.edu.cn

项目支持:国家科技重大专项“致密油气藏多尺度介质复杂结构井数值试井分析方法及应用研究”(2017ZX05009005-002)

引用:陈超峰,孙刚,毛新军,等. 高探 1 井储层评价与产能分析[J]. 油气井测试,2020,29(5):61-67.

Cite: CHEN Chaofeng, SUN Gang, MAO Xinjun, et al. Reservoir evaluation and productivity analysis of Well Gaotan 1 [J]. Well Testing, 2020,29(5): 61-67.

摘要 通过压力恢复数据及储层岩石特性,建立符合高探 1 井地层真实状况的双孔介质部分射开“U”形边界数学模型,采用 Laplace 变换及分离变量法对数学模型进行求解,利用 Stechfest 数值反演绘制出压力及其导数双对数试井曲线,对高探 1 井压力恢复资料进行解释分析;采用瞬时 IPR 曲线预测产能,采油指数高达 $22.73 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$ 。结果表明,高探 1 井储层物性好,压力高,污染小,具备高产且长期稳产的能力。高探 1 井在试油期间录取的大量动态数据,可为油气开发制度的制定提供可靠依据。

关键词 双孔介质;数值试井;解释模型;Laplace 变换;产能分析;储层评价;采油指数

中图分类号:TE357 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.05.011

Reservoir evaluation and productivity analysis of Well Gaotan 1

CHEN Chaofeng¹, SUN Gang², MAO Xinjun¹, HU Guangwen³, FENG Meng³, XIAN Yuxi²

- 1. Exploration Division, PetroChina Xinjiang Oilfield Branch, Karamay, Xinjiang 834000, China
- 2. Oil and Gas Research Center, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230022, China
- 3. Oil Testing Branch, CNPC Western Drilling Engineering Co., Ltd., Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Based on the pressure recovery data and rock characteristics of the reservoir, a mathematical model of the dual-pore medium in accordance with the real conditions of the Well Gaotan 1 was established, which partially penetrated the formation with a U-shaped boundary. Solve the mathematical model with Laplace transform and variable separation method. Double logarithmic well testing curves of pressure and its derivative were drawn by Stechfest numerical inversion. And the pressure build-up data of Well Gaotan 1 was interpreted and analyzed. Predict productivity using instantaneous IPR curve, with oil production index as high as $22.73 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$. The results show that the reservoir physical properties of Well Gaotan 1 are good with high pressure and small pollution. And the reservoir has a high productivity for long-term and stable production. The large amount of dynamic data collected during the oil testing of Well Gaotan 1 can provide a reliable basis for the formulation of oil and gas development systems.

Keywords: Dual-pore medium; numerical well testing; model interpretation; Laplace transform; productivity analysis; reservoir evaluation; oil production index

高探 1 井采用 13.0 mm 油嘴试产时,油压 32.4 MPa,日产油 $1\,213 \text{ m}^3$,日产气 $32.17\times 10^4 \text{ m}^3$,创中国陆上碎屑岩直井产量最高纪录。高探 1 井在试油期间录取了大量的动态数据,利用录取的动态数据对储层进行评价,为该井从试油转为开发井后,制定油气开发制度提供依据。

试井分析利用关井所测的井底压力随时间变

化的资料来分析地层和井筒参数,是地层评价的重要手段,使用试井得到的参数可为产能预测和油气田开发方案的制定提供参考依据^[1-2]。目前试井分析技术已发展的比较成熟,针对不同油藏边界条件下可利用直线段分析法、曲线段拟合法、非线性回归法等得到解释参数,利用无量纲 Horner 检验法、压力历史拟合验证其准确性^[3-4]。各种方法已嵌入

到商业化试井解释软件中并在在油田实际生产得到应用,如 UST 数值试井软件^[5]。

试井分析主要考虑不同的地质结构、流体类型、井模型及边界形状等因素来建立渗流方程并确定其定解条件,通过渗流方程求解方法计算得到试井分析图版,再通过图版拟合获得相应的地层参数^[6-7]。因此,建立与实际地层相符的渗流模型是试井获得准确地层参数的关键。

渗流模型中最简单的模型是均质各向同性地层模型^[8],均质无限大地层的双对数无量纲压力及压力导数图版特征为早期是一条斜率为 1 的直线,后期的压力导数曲线的斜率无限趋近于 0.5。而双孔介质模型^[9]描述的是将地层分为基质和裂缝两部分,假定流体只通过裂缝进入井筒,基质块孔隙中流体流入裂缝,而直接流入井筒的流量可忽略不计,其中储容比、窜流系数表征双孔介质^[10]。适用于非均质地层的试井模型为复合油藏模型^[11],如径向、线性复合油藏,该模型需要考虑界面半径、流度比和储容比等参数。此外,还有更加复杂的组合模型,如三重介质模型^[12]。

根据压力恢复测试资料初步分析可知高探 1 井的地层是部分射开的。有大量学者对均质油藏部分射开问题进行了研究,Ozkan E. 等^[13]推导出无限大均质地层中直井部分射开的点源解。Kuchuk F. J. 等^[14]和 Yildiz T. 等^[15]也分别研究了均质油藏部

分射开井的压力态特征。王建平等^[16]研究了各向异性部分射开直井的不稳定渗流问题。而对于双重介质油藏,往往考虑完全射开情况^[17-18],对部分射开研究较少。

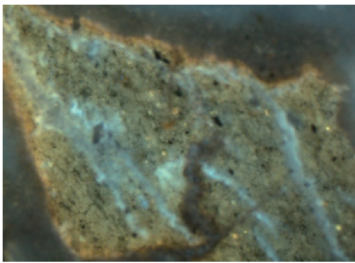
本文通过压力恢复数据及储层岩石特性,建立了双重介质部分射开数学模型,采用 Laplace 变换及分离变量法对数学模型进行求解,利用 Stechfest 数值反演绘制出压力及压力导数双对数试井典型曲线。利用双孔地层部分射开模型对高探 1 井的压力恢复资料进行解释分析,结合井口采集的生产数据分析对储层进行评价,预测高探 1 井的产能。

1 高探 1 井储层诊断

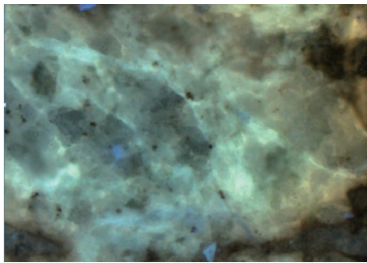
高探 1 井所在的准噶尔盆地南缘为油气富集区域,为南缘下组合勘探第一口高产井,试采产量高且稳定,供烃能力强,具备发育良好的储集层。

1.1 高探 1 井储层描述

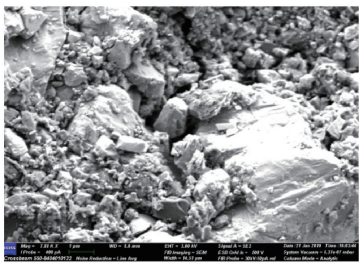
高探 1 井位于南缘冲断带四棵树凹陷,完钻井深 5 920.0 m。试油层位:白垩系清水河组,射开位置 5 768.0~5 775.0 m,测井孔隙度 16.94%;薄片及扫描电镜显示,粒缘缝、微裂缝发育、粒间孔、粒间溶蚀孔发育,储层基质物性好,微细裂缝发育,可能发育复杂缝网。图 1 给出了高探 1 井荧光薄片及扫描隧道显微镜图片及观察结果。



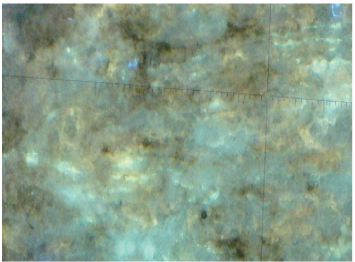
a1. 粉砂质泥岩,微裂缝中具荧光显示



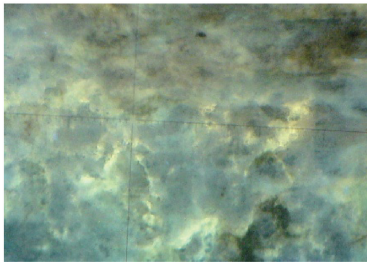
a2. 灰质粉细砂岩,微裂缝中具荧光显示
a. 井段 5 768.0~5 775.0 m



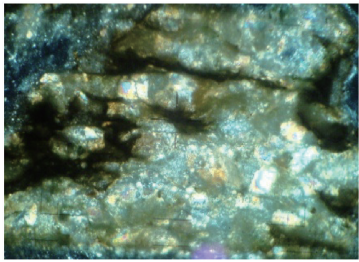
a3. 灰质细砂岩,发育粒间孔及微裂缝



b1. 中细砂岩(岩屑)发育复杂微裂缝



b2. 部分碎屑颗粒发生碎裂
b. 井段 5 918.0~5 920.0 m



b3. 细砂岩发育微裂缝

图 1 高探 1 井荧光薄片及扫描隧道显微镜图片结果

Fig. 1 Image of fluorescence slice and scanning tunneling microscope

1.2 高探1井地震、测井及试井测试资料

高探1井含油层井段5 767.5~5 779 m,射开井段5 768.0~5 775.0 m,显示地层未全射开。通过对高探1井的压力恢复数据进行压力恢复压力及压力导数双对数分析(图2),可以看出有一段斜率为-0.5的直线段(标为红色),则表示具有球形流特征和部分射开特征。

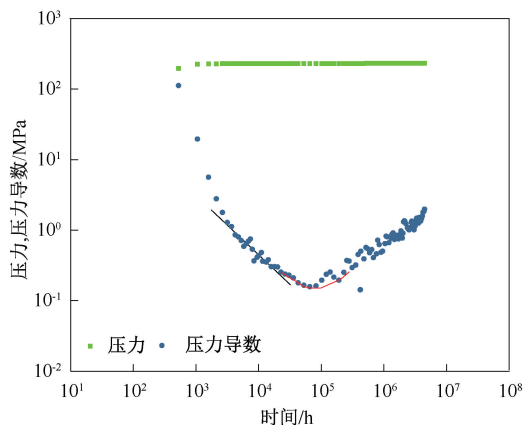


图2 高探1井压力及其导数双对数图

Fig. 2 Double logarithmic curve of pressure and its derivative for Well Gaotan 1

图2存在“V”字曲线特征,结合表1荧光薄片及扫描隧道显微镜图等资料,可判断储层存在天然裂缝,表现出双孔地层特征;再根据高探1井所在区块构造图可知,其周围有断层,依据井位关系及压力恢复双对数压力导数曲线后期出现上翘的特征(图2),可将外边界简化为“U”形。综上所述,高探1井试井模型为双孔介质部分射开“U”形外边界。

2 双孔介质部分射开试井理论

由于油井部分射开,地层中的流体流动不仅存在径向流动,而且还存在垂向的流动。垂向流动油藏中的气顶或底水影响井底压力,导致部分射开井

的井底压力曲线特征复杂。

2.1 数学模型的建立

在无限大地层中,不考虑井筒存储和表皮因子,用乘积法得到瞬时源情况下部分射开井的井底压力解。对井底压力作 Laplace 变换,得到瞬时源情况下 Laplace 空间上的井底压力,再对井底压力进行 Laplace 数值反演,得到部分射开井井底压力与时间的数值关系。

在 Laplace 空间上双孔、无限大地层部分射开井的无量纲方程可表示为

$$\frac{1}{r_D} \frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \bar{p}_D}{\partial r_D} \right) + \frac{\partial^2 \bar{p}_D}{\partial z_D^2} = u f(u) \bar{p}_D \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{p}_D}{\partial z_D} \Big|_{z_D=0} = 0 \quad (\text{上顶封闭}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{p}_D}{\partial z_D} \Big|_{z_D=h_D} = 0 \quad (\text{下底封闭}) \quad (3)$$

$$\bar{p}_D(r_D \rightarrow \infty, z_D, u) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{p}_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -\frac{1}{u L_0} \quad z_{aD} \leq z_D \leq z_{bD} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{p}_D}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = 0 \quad (\text{其他}) \quad (6)$$

其中

$$z_D = \frac{z}{z_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_z}}, h_D = \frac{h}{r_w} \left(\sqrt{\frac{K_h}{K_z}} \right)^2, L_D = \frac{z_b - z_a}{h}$$

$$z_{aD} = \frac{z_a}{R_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_z}}, z_{bD} = \frac{z_b}{R_w} \sqrt{\frac{K_h}{K_z}}$$

式中: u 为 Laplace 变换的变量; z 为高度变量; r_w 为井筒半径,m; z_a, z_b 分别为射开部分上边界和下边界高度,m; h 为地层厚度,m; K_h, K_z 分别为水平渗透率和垂直渗透率,mD。

对无底水和气顶的油藏井底压力进行 Fourier 级数展开,即

$$\bar{p}_D(r_D, z_D) = \frac{1}{u} \frac{K_0(\sqrt{uf(u)})}{\sqrt{uf(u)} K_1 \sqrt{uf(u)}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[\sin\left(\frac{n\pi z_b}{h}\right) - \sin\left(\frac{n\pi z_a}{h}\right) \right] K_0 \left[\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D}\right)^2 + uf(u)} r_D \right] \cos\left(\frac{n\pi z}{h}\right)}{u \sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D}\right)^2 + uf(u)} K_1 \left[\sqrt{\left(\frac{n\pi}{h_D}\right)^2 + uf(u)} \right] n\pi L_D} \quad (7)$$

其中

$$f(u) = \frac{\omega(1-\omega)u + \lambda}{(1-\omega)u + \lambda}$$

对具有“U”形边界油藏的高探1井可看作一个点源,并利用镜像井理论把实际点源与镜像点源进行叠加得到实际井底压力。图3为高探1井“U”形

边界镜像井示意图(黑色点代表高探1井,淡蓝色点代表其镜像点)。

考虑井筒储集和表皮,双孔部分射开“U”形油藏的井底压力可表示为

$$\bar{p}_{wD}(u) = \frac{f(u) \bar{p}_D(f(u)) + S_m}{u \{ 1 + C_D u [f(u)] \bar{p}_D(f(u)) + S_m \}} \quad (8)$$

其中

$$C_D = \frac{C}{2\pi h [(\phi C_t)_f + (\phi C_t)_m] r_w^2}$$

式中： $\bar{p}_D(f(u))$ 为“U”形油藏在无表皮和井筒储集情况下的解； S_m 为受污染表皮系数； C 为井筒储集常数， m^3/MPa ； ϕ 为孔隙度； C_t 为综合压缩系数， MPa^{-1} ；下标 D 表示无因次；下标 f, m 分别表示裂缝和基质。

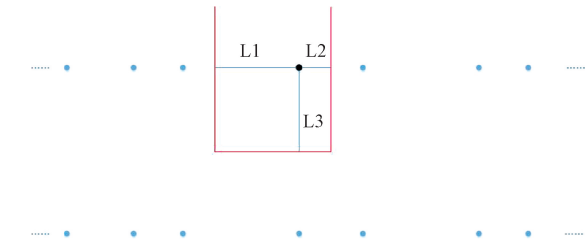


图 3 高探 1 井镜像井示意图
Fig. 3 Mirror well of Well Gaotan 1

对上述方程进行 Stechfest 数值反演,得到试井分析图版。图 4 给出 h_D/C_D 分别为 10^4 、 10^5 和 10^6 时均质无限大地层双对数压力及导数典型曲线图。可以看出,部分射开井典型曲线由井储段、污染表皮影响段、球形流段及系统径向流 4 个阶段组成,其中球形流段与射开段高度、水平与垂直方向的渗透率比值有关,其无量纲参数 h_D 越大,球形流特征越明显^[19]。

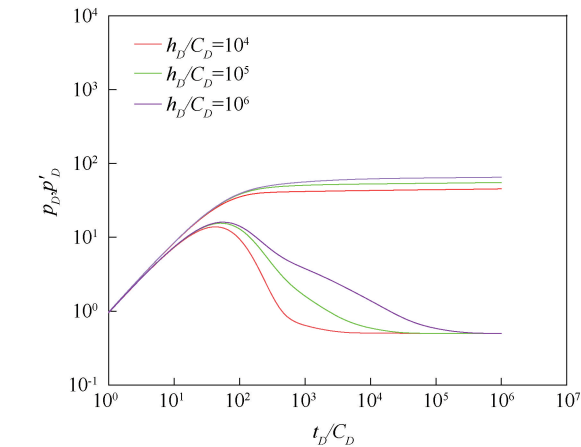


图 4 无限大均质地层 h_D/C_D 变化时的典型曲线图
Fig. 4 Typical curve when h_D/C_D changes in an infinite homogeneous formation

2.2 高探 1 井压力恢复资料解释分析

2019 年 1 月高探 1 井开始下压力计进行测试,采用 3~13 mm 范围内的油嘴进行试采,其产量数据见表 1。可以看出,该井最高可日产油 $1\,223\,m^3$,日产气 $32.2\times 10^4\,m^3$ 。

表 1 不同尺寸油嘴试采的产量数据
Table 1 Pilot production data with different sizes of nozzles

持续 时间/h	油产量/ ($m^3\cdot d^{-1}$)	气产量/ ($10^4\,m^3\cdot d^{-1}$)	油气总产量/ ($m^3\cdot d^{-1}$)
1. 770 00	93	3. 95	128. 785
2. 484 17	236	6. 90	277. 209
15. 125 80	306	10. 10	377. 429
3. 863 30	399	13. 10	491. 096
2. 074 17	511	16. 80	629. 996
3. 386 94	606	20. 90	762. 001
1. 950 00	677	24. 10	863. 755
6. 016 67	809	27. 50	1 011. 800
7. 141 67	373	14. 60	496. 241
1. 383 33	567	21. 40	743. 155
0. 966 67	777	25. 30	954. 194
4. 575 00	1 075	31. 70	1 266. 93
0. 250 00	1 213	32. 20	1 372. 49
2. 225 00	567	21. 40	743. 155
16. 383 30	373	14. 60	496. 241
100. 992 00	288	1. 10	378. 458
1 396. 940 00	198	6. 90	250. 216

2.2.1 高探 1 井试井分析基本参数

利用高探 1 井压力恢复进行试井分析所需要的基本参数:地层温度 $134\,^{\circ}C$,地层压力 $133.17\,MPa$,井筒半径 $0.1\,m$,孔隙度 0.184 ,地面油密度 $2.13\,g/m^3$ 、黏度 $2.13\,mPa\cdot s$,气油比 256.9 ,地层油体积系数 $1.481\,4$,地层油密度 $0.699\,2\,g/m^3$ 、黏度 $0.258\,mPa\cdot s$,饱和压力 $29.15\,MPa$,射开厚度 $7\,m$ 。

2.2.2 高探 1 井地层参数评价

根据双孔介质部分射开理论及高探 1 井的储层资料,选择利用“井储+双孔部分射开储层+“U”形油藏”模型进行试井解释分析^[20]。

从图 5、图 6、图 7 可以看出,压力及其导数双对数拟合、压力历史拟合及无量纲 Horner 检验图拟合质量很高。图 7 是对压力历史拟合的局部展开图,可以看出每个流量历史下的压力历史拟合质量都较高,解释结果具有较高的可信度。

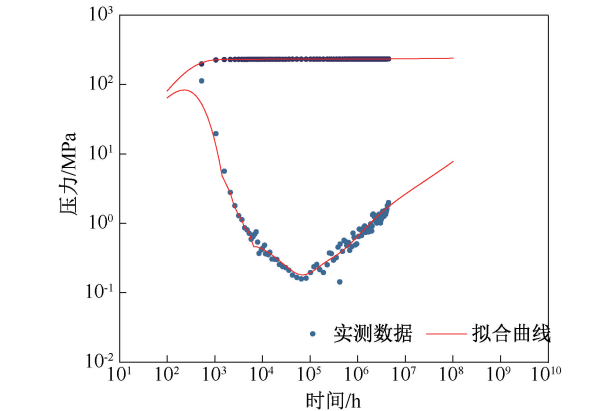


图 5 高探 1 井双对数导数曲线拟合图
Fig. 5 Double logarithmic derivative curve fitting of Well Gaotan 1

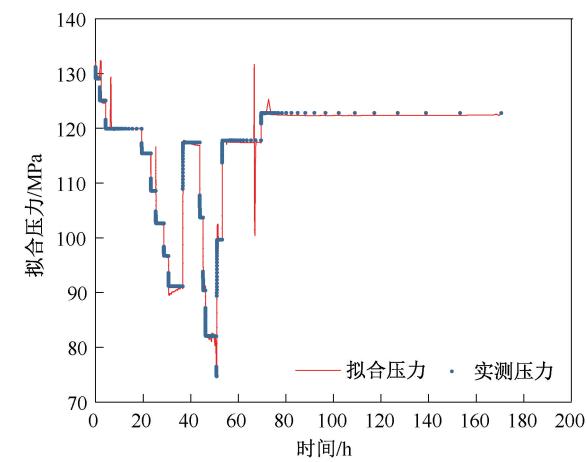


图 6 高探 1 井压力历史拟合图(局部放大)
Fig. 6 Pressure historical fitting of Well Gaotan 1 (Local magnification)

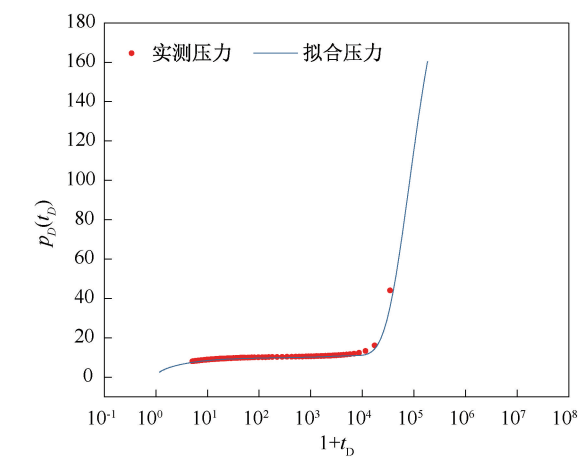


图 7 高探 1 井无量纲 Horner 检验图
Fig. 7 Dimensionless Horner inspection curve for Well Gaotan 1

通过利用“井储+双孔部分射开储层+“U”形油藏”模型进行试井解释分析,得到高探 1 井拟合所得地层参数:拟合油藏压力 133. 699 MPa,污染表皮系数 9. 672,总表皮系数 191. 067,水平渗透率 204. 274 mD,垂直渗透率 1. 14 mD,边界 1 为 800 m,边界 2 为 2 560 m,边界 3 为 3 997 m,储容比 0. 15,窜流系数 $2. 071 \times 10^{-7}$,井储常数 0. 050 161 m^3/MPa ,射开程度 0. 315。

由此可以看出,高探 1 井垂直方向渗透率为 1. 14 mD,水平方向渗透率为 204. 274 mD。垂直方向和水平方向渗透率是通过图版曲线和曲线特征共同决定的,具有一定的可靠性。

为了进一步验证对高探 1 井地层渗透率解释的准确性,对高探 1 井的生产数据进行拟合分析,拟合结果如图 8、图 9 和图 10 所示。

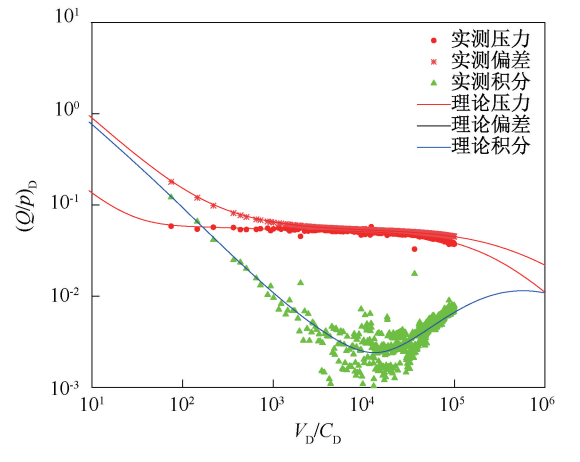


图 8 Blasingame 典型曲线图版拟合结果
Fig. 8 Fitting results of Blasingame typical curve chart

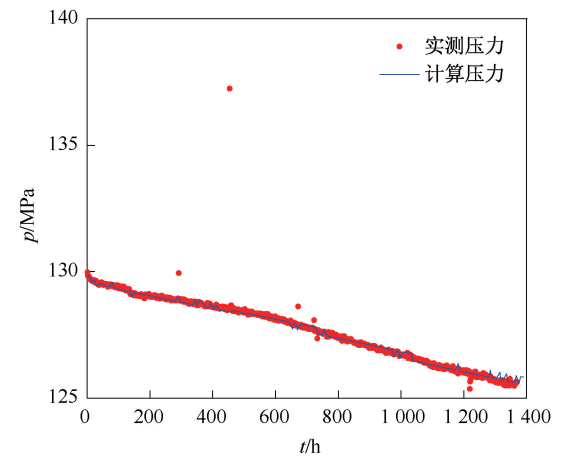


图 9 高探 1 井的压力历史拟合图
Fig. 9 Pressure historical fitting of Well Gaotan 1

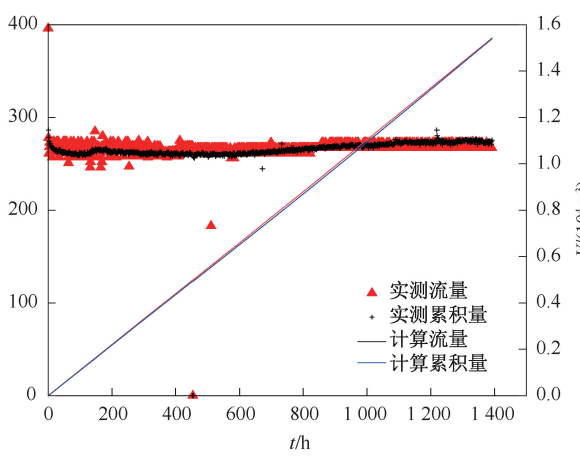


图 10 高探 1 井流量历史拟合图
Fig. 10 History matching of flow rate for Well Gaotan 1

生产数据拟合得到的水平渗透率 194. 47 mD,两者结果非常接近。因此,可以认为高探 1 井目前开发层段为高渗层,存在垂向流动,但垂向渗透

评价结果的可靠性。

(2)根据试井分析得到的总表皮大,主要是因为部分射开引起的流线弯曲造成的,但也存在井壁污染($S_m=9.672$)。由试井获得射开程度 b 可知,储层的实际含油气的有效厚度23.492 m远大于射开厚度7.4 m,油藏边界为“U”形,井至边界的距离远,具备长期稳产能力。

(3)通过试井解释得到的地层参数,使用瞬态IPR方法对该井产能进行了预测分析,发现采油指数高达 $22.73 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{MPa})$,这说明高探1井稳产的潜力巨大。

(4)综合分析可知,高探1井储层物性好,压力高,污染小,具备获高产且长期稳产的能力。

致谢:感谢新疆油田分公司勘探事业部杜宗和工程师,以及西部钻探工程有限公司试油公司高亮工程师的帮助与指导。

参考文献

- [1] 哈利德·阿齐兹(加),安东尼·塞特瑞(著). 袁士义,王家禄(译). 油藏数值模拟[M]. 北京:石油工业出版社,2004:23-28.
- [2] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 第2版. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010:31-36.
- [3] AHN S H, HORNE R N. Analysis of permanent downhole gauge data by cointerpretation of simultaneous pressure and flow rate signals [C]. SPE 115793, 2008.
- [4] AL QUAIMI B, AMINIAN K, AMERI S. Interpretation of well test data from two hydraulically communicating reservoirs [M]. West Virginia: West Virginia University, 2012: 15-29.
- [5] 李道伦,查文舒. 高等学校教材:数值试井理论与方法[M]. 北京:石油工业出版社,2013:15-32.
- [6] ATKINSON D I, REKSTEN O, SMITH G, et al. High-accuracy wet-gas multiphase well testing and production metering [J]. SPE Journal, 2006,11(2):199-205.
- [7] SAMPAYO-TRUJILLO A, CAMACHO-VELAZQUEZ R. Influence of nonuniform initial pressure distribution in well test data [C]. SPE 59012, 2000.
- [8] LARSEN L, HOVDAN M. Analyzing well test data from linear reservoirs by conventional methods[C]. SPE 16777, 1987.
- [9] MCLACHLAN D S. Measurement and analysis of a model dual-conductivity medium using a generalized effective-medium theory [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1989,157(1):188-191.
- [10] GERKE H H, VAN GENUCHTEN M T. A dual-porosity model for simulating the preferential movement of water

and solutes in structured porous media [J]. Water Resources Research, 2010,29(2):305-319.

- [11] ACOSTA LG, AMBASTHA A K. Thermal well test analysis using an analytical multi-region composite reservoir model [C]. SPE 28422, 1994.
- [12] DEHGHANPOUR H, SHIRDEL M. A triple porosity model for shale gas reservoirs [C]. SPE 149501, 2011.
- [13] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well-test-analysis problems: Part 1-Analytical Considerations [J]. SPE Formation Evaluation, 1991,6(3):359-368.
- [14] KUCHUK F J, KIRWAN P A. New skin and wellbore storage type curves for partially penetrated wells [J]. SPE Formation Evaluation, 1987,2(4):546-554.
- [15] YILDIZ T, BASSIOUNI Z A. Transient pressure analysis in partially-penetrating wells [C]. SPE 21551, 1990.
- [16] 王建平,王晓冬,马世东. 各向异性部分射开直井不稳定渗流理论研究[J]. 大庆石油地质与开发,2007,26(3):65-67,71.
WANG Jianping, WANG Xiaodong, MA Shidong. Unstable filtration theory study on straight well penetrating in various parts [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007,26(3):65-67,71.
- [17] ONUR M, SATMAN A. New type curves to determine naturally fractured reservoir parameters [C]. SPE 23830, 1991.
- [18] ONUR M, SATMAN A, REYNOLDS A. New type curves for analyzing the transition time data from naturally fractured reservoirs [C]. SPE 25873, 1993.
- [19] 张俊伟. 部分射开试井解释模型在海拉尔油田的应用探讨[J]. 油气井测试,2015,24(5):33-35.
ZHANG Junwei. Application of part of the perforated well test interpretation model in Hailaer Oilfield [J]. Well Testing, 2015,24(5):33-35.
- [20] 张利军,郑伟,王帅,等. 厚层强非均质油藏部分射开试井曲线特征及影响因素[J]. 油气井测试,2018,27(4):1-6.
ZHANG Lijun, ZHENG Wei, WANG Shuai, et al. Characteristics of well testing curves and influencing factors for thick and strong heterogeneous reservoirs with partially perforated [J]. Well Testing, 2018,27(4):1-6.

编辑 穆立婷

第一作者简介:陈超峰,男,1971年出生,硕士,高级工程师,1996年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,现主要从事试油试井、储层改造技术。电话:0990-6882413;Email:ccf@petrochina.com.cn。通信地址:新疆自治区克拉玛依市中国石油新疆油田公司勘探事业部,邮政编码:834000。