

文章编号: 0253-9985(2009)06-0773-06

物质平衡方法在缝洞型碳酸盐岩油藏 能量评价中的应用

李江龙^{1,2}, 张宏方¹

(1 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

(2 中国科学院 渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要: 把缝洞单元的驱动类型划分为封闭弹性驱动、有水侵的弹性驱动、有封闭水体的弹性驱动及有封闭水体和水侵的弹性驱动 4 种。给出了每种驱动类型的物质平衡方程, 所给出的方程充分结合了缝洞型碳酸盐岩油藏的特点, 区别于以往的物质平衡方程。提出了缝洞单元的弹性产率、水侵量及封闭水体的水体倍数等评价缝洞单元能量的指标, 建立了缝洞型碳酸盐岩油藏的能量评价方法。该方法能够对缝洞单元能量特征和驱动类型进行判断, 并对能量和水侵量进行定量计算。实例计算结果表明, 建立的方法能够较好地评价缝洞单元的能量特征。

关键词: 水侵量; 驱动类型; 缝洞单元; 能量评价; 碳酸盐岩; 物质平衡方法

中图分类号: TE31 **文献标识码:** A

Application of the material balance method to the energy evaluation of fractured-vuggy carbonate reservoirs

Li Jianglong², Zhang Hongfang

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

(2 Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics Chinese Academy of Sciences Langfang Hebei 065007 China)

Abstract: The driving mechanisms of the fractured-vuggy units are classified into four types: closed elastic drive, elastic drive with water invasion, elastic drive with closed aquifer, and elastic drive with both closed aquifer and water invasion. A material balance equation is established for each type of driven mechanism. These equations take the characteristics of fractured-vuggy carbonate reservoirs into full consideration and thus are different from the former equations. This paper puts forward several indexes for evaluating the energy of fractured-vuggy units, including the elastic production rate, the volume of water invasion, and multiple of closed aquifer, and proposes a method for evaluation of fractured-vuggy carbonate reservoirs. This method can determine the energy characteristics of fractured-vuggy units and drive mechanisms and can be used to quantitatively calculate the energy and invasion water volume. The calculated results show that the established method can be used to evaluate the energy characteristics of fractured-vuggy units.

Key words: water invasion volume; drive mechanism; fractured-vuggy unit; energy evaluation; carbonate rocks; material balance method

缝洞单元是新疆塔里木盆地塔河油田开发研究、动态分析、开发管理的基本单元^[1,2]。目前, 塔河油田碳酸盐岩油藏主要以天然能量开发为主, 影响油藏开发特征的因素除了储集空间类型、缝洞单

元规模和结构特征、开发井网及技术政策之外^[3~5], 关键在于缝洞单元的能量特征, 但目前尚未建立起针对缝洞型碳酸盐岩油藏的能量评价方法。本文根据缝洞型碳酸盐岩油藏的储集体特征和流体流

收稿日期: 2009-09-10

第一作者简介: 李江龙(1962-)男, 高级工程师, 博士研究生, 油藏工程。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目“碳酸盐岩缝洞型油藏开发基础研究”(2006CB202400); 国家科技重大专项大型油气田及煤层气开发项目“碳酸盐岩油田开发关键技术”(2008ZX05014-003)。

动特征^[6~14],对缝洞单元与水体之间的连通关系进行简化、分类和描述,给出缝洞单元的驱动类型及与水体的连通模式,提出适合缝洞型碳酸盐岩油藏能量评价的物质平衡方程,并结合缝洞单元的压力变化史评价实际缝洞单元的能量特征。

1 概述

塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏具有储层连通网络多变、裂缝切割展布规律复杂、流体性质多变、流体分布及油水关系相当复杂等特点。油藏开发实践证实,油藏呈现出多缝洞系统、多压力系统、多个渗流单元的特征。开发过程中形成的共识是以缝洞单元为开发和管理对象,把具有统一的压力系统的、由溶洞和裂缝网络相互连通的缝洞储集体定义为缝洞单元。

塔河油田开发早期主要依靠天然能量开采,单井和缝洞单元的递减规律和产水规律差别很大:有的油井可以连续数年以每天几百立方米的产量生产,有的油井生产几天后即停喷;有的油井长期无水生产,有的油井开井便见水;油井含水上升呈现出缓

慢上升、快速上升、台阶上升和波动等多种规律。
缝洞单元的生产特征差别也很大,表现在如下几个方面:①缝洞单元的大小差别大,有大面积连通、生产井数达几十口井、累积产量达数百万吨的单元,也有单井控制、面积很小、累积产量只有几百吨的单元;②缝洞单元的递减规律不同,有的单元以很小的递减率保持多年生产,有的单元很短时间就失去了产量;③缝洞单元的产水规律差别大,有长期保持无水生产、累积产油量达上百万吨的单元,也有生产初期即见水、含水率不断上升的单元。
缝洞单元的生产特征取决于缝洞单元内部和外部的连通关系,它是制定缝洞单元开发技术、政策的依据。因此,必须针对缝洞型碳酸盐岩油藏的地质特征和开发特征,对缝洞单元的驱替类型进行划分。

2 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元类型划分

本文对缝洞单元连通关系的认识是把缝洞单元当作一个整体看待。根据缝洞单元与水体的连通关系,可把缝洞单元划分为以下 4 种类型(图 1)。

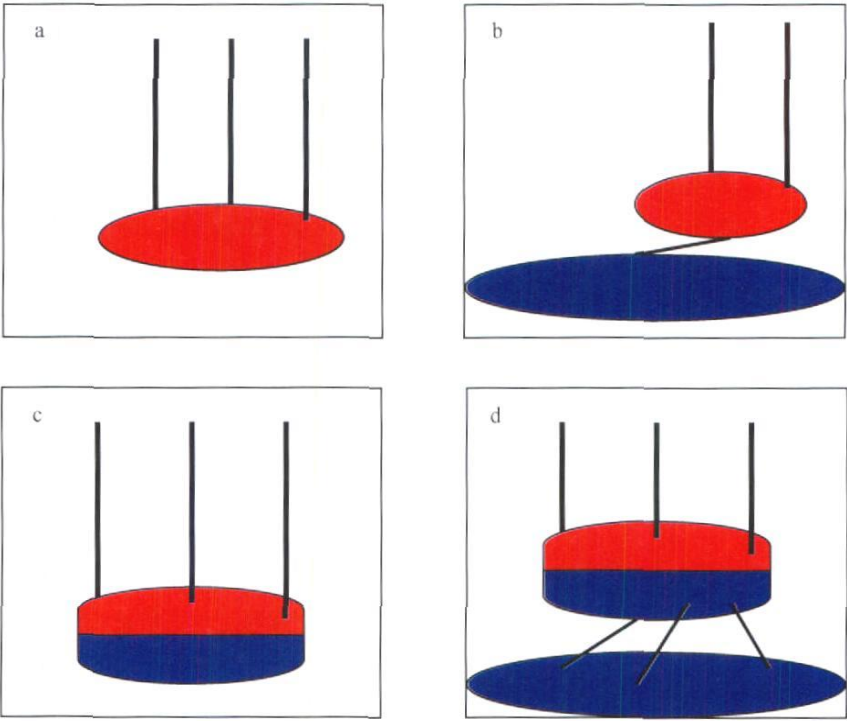


图 1 缝洞单元类型划分

Fig 1 Types of fractured-cavity units

a 封闭的缝洞单元; b 有水侵的缝洞单元; c 有封闭水体的缝洞单元; d 有封闭水体和水侵的缝洞单元

1) 封闭的缝洞单元, 原油在封闭的缝洞单元中, 不与水体相连通。这类缝洞单元的生产特征是在累积产油量较高时仍不产水, 缝洞单元的压力不断下降, 下降速度与单元的大小和采油速度有关。

T452 TK630 TK715 T702 B TK721和 TK1007单元都是这类缝洞单元中比较典型的单元。

2) 有水侵的缝洞单元, 水不在原油所在的缝洞单元中, 水所在的缝洞与油所在的缝洞单元之间有裂缝沟通。这类单元的生产特征是生产到一定阶段时缝洞单元的压力下降速度减缓, 甚至不再有明显的下降, 但缝洞单元的产水量不断增加。S48 TK413 S67和 T705单元都是这类缝洞单元中比较典型的单元。

3) 有封闭水体的缝洞单元, 水与油处于同一缝洞单元中。这类单元的生产特征是生产时缝洞单元的压力不断下降, 表现出封闭的特征, 但缝洞单元产水, 且产水量不可忽略。T606单元是这类缝洞单元中比较典型的单元。

4) 有封闭水体和水侵的缝洞单元, 既有与油藏处于同一缝洞中的水体, 也有与油藏不在同一缝洞中的水体。这类单元的生产特征与有水侵的缝洞单元类似, 但见水时间更早。由于对于缝洞型碳酸盐岩油藏, 用静态方法计算储量有困难, 用动态方法计算时, 若不清楚原油储量, 则不容易判断出封闭在同一单元中的水体的大小, 也不容易判断出外部水体的强弱, 因此在缝洞单元的静态原油地质储量这一难题解决之前, 是不容易确定这类单元的。

3 缝洞型碳酸盐岩油藏能量评价的物质平衡方法

缝洞型碳酸盐岩油藏的流体分布和流动规律复杂, 在目前的认识程度下, 从流动的角度评价缝洞单元的能量比较困难, 因此零维流动的物质平衡方法可在这类油藏的评价中发挥积极作用, 但必须结合缝洞型油藏的特点对现有的物质平衡方法进行修改、补充和完善。驱动指数法、采出 1% 地质储量的油藏压降法等方法尽管可以在一定范围内应用, 但若 not 结合缝洞单元的实际类型划分, 就不能对计算结果作出合理的分析。

由于塔河缝洞型碳酸盐岩油藏主体区块基本无气顶, 油藏压力远高于饱和压力, 原始气油比

低, 为了简化问题, 下面讨论的方法不涉及有气顶的情况和溶解气驱的情况。

3.1 封闭弹性驱动单元

对于封闭、没有气顶气、没有底水、没有水侵、没有注水的缝洞型碳酸盐岩油藏, 当油藏压力高于饱和压力时, 物质平衡方程式可以简化为

$$N_i B_i = N B_i C_i (P_i - P) \tag{1}$$

式中: N_i ——累积产油量, 10^4 m^3 ;
 N ——动用储量, 10^4 m^3 ;
 P_i ——原始缝洞单元压力, MPa;
 P ——目前缝洞单元压力, MPa;
 B_i —— P_i 压力下的原油体积系数, 无量纲;
 B —— P 压力下的原油体积系数, 无量纲;
 C_i ——油藏总压缩系数, 由原油与岩石的压缩系数组成, MPa^{-1} 。

根据 $N_i B_i$ 与 $(P - P_i)$ 之间的直线关系, 用实际数据点拟合出斜率后, 用斜率计算出 $N B_i C_i$ 或储量 N 将 $N B_i C_i$ 定义为缝洞单元的弹性产率 (弹性能量), 单位为 $10^4 \text{ m}^3 / \text{MPa}$ 表示缝洞单元压力每下降 1 MPa 采出的原油体积。在缝洞型油藏的综合压缩系数难以准确确定的情况下, 不易计算动用储量 N 但用物质平衡方程计算出的弹性产率可较准确地反映出缝洞单元的能量大小。

3.2 有水侵的弹性驱动单元

对于没有气顶气和注水的缝洞型碳酸盐岩油藏, 当油藏压力高于饱和压力时, 物质平衡方程式可以简化为

$$N_i B_i = N B_i C_i (P_i - P) + W_e - W_p B_w \tag{2}$$

式中: W_e ——累积水侵量, 10^4 m^3 ;
 W_p ——累积产水量, 10^4 m^3 ;
 B_w —— P 压力下的地层水体积系数, 无量纲。

对于处于开发早期的油藏, 采油量和采水量很小, 可以假定水侵量也很小而予以忽略, 从而将 (2) 式简化为 (1) 式, 用早期的数据作直线计算弹性产率 $N B_i C_i$ 。如果实际数据点偏离直线, 可计算出水侵量 W_e (图 2)。

对于碎屑岩油藏, 在储量未知的情况下, 一般应根据供水区域的几何形状、大小、孔隙度、渗透率、油水粘度比等参数进行边水能量分析, 划分水侵类型, 计算出水侵量, 然后根据 (2) 式计算出储

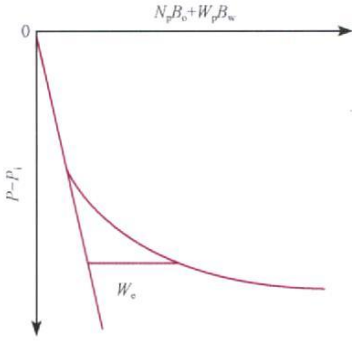


图 2 缝洞单元降压—亏空示意图

Fig 2 Pressure drop vs depletion of a fractured vuggy unit

量。但对于缝洞型碳酸盐岩油藏,由于难以确定缝洞单元的边界和油水在空间上的分布关系,这种方法的应用受到限制;但可利用早期的生产数据求得储量,然后再计算水侵量。

3.3 有封闭水体的弹性驱动单元

在用物质平衡法对缝洞单元的储量进行计算时发现,对于有些缝洞单元, $(N_p B_o + W_p B_w)$ 与 $(P - P_i)$ 之间的关系为直线关系,即没有偏离图 2 中的直线,这说明没有底水侵入;但生产动态反映出有水产出。对这种现象的合理解释是,水与油处于同一缝洞中,水的弹性与油的弹性及岩石的弹性一起发挥作用,不存在滞后现象。在这种情况下,应重新建立物质平衡方程,把产量看作是油藏部分的弹性和水体部分的弹性共同贡献的结果,即

$$\begin{aligned} N_p B_o + W_p B_w = \\ N B_{oi} C_i (P_i - P) + W B_{wi} C_{wt} (P_i - P) \end{aligned} \quad (3)$$

或

$$N_p B_o + W_p B_w = (N B_{oi} C_i + W B_{wi} C_{wt}) (P_i - P) \quad (4)$$

式中: W ——水体的大小,不是水侵量,类似原油储量 N 不随压差的变化而变化, 10^4 m^3 ;
 B_{wi} —— P_i 压力下的地层水体体积系数,无量纲;
 C_{wt} ——水体的压缩系数,由水与岩石的压缩系数组成, MPa^{-1} 。

可以看出,这种类型的物质平衡方程是缝洞型碳酸盐岩油藏所独有的。

根据 (4) 式,用 $(N_p B_o + W_p B_w)$ 与 $(P - P_i)$ 之间

的关系拟合出的是 $N B_{oi} C_i + W B_{wi} C_{wt}$, 不能同时得到原油储量 N 和水体大小 W 只能在用其他方法确定其中一个量的情况下求得另一个量。例如,若认为静态方法计算的储量 N 可靠,则可用这种方法计算出水体的大小。封闭水体的水体倍数为

$$R_{wo} = \frac{V_w}{V_o} = \frac{W B_{wi}}{N B_{oi} / S_{oi}} \quad (5)$$

式中: R_{wo} ——封闭水体的水体倍数,无量纲;

V_w ——封闭水体中水的体积, 10^4 m^3 ;

V_o ——封闭水体中油的体积, 10^4 m^3 ;

S_{oi} ——原始含油饱和度,小数。

即使不能同时确定 N 与 W (4) 式反映的 $(N_p B_o + W_p B_w)$ 与 $(P - P_i)$ 之间的直线关系仍可用于缝洞单元未来产量与压差之间关系的预测。另外,若 $W_p B_w$ 不可忽略,则 $(N_p B_o + W_p B_w)$ 与 $(P - P_i)$ 之间的直线关系至少说明缝洞单元中油水共存。

水体弹性产率与油藏弹性产率的比值 (E_w , 无量纲) 为

$$E_w = \frac{W B_{wi} C_{wt}}{N B_{oi} C_i} = \frac{C_{wt}}{S_{oi} C_i} R_{wo} \quad (6)$$

3.4 有封闭水体和水侵的弹性驱动单元

这种情况相当于有封闭水体和水侵两种情况的结合,物质平衡方程为

$$\begin{aligned} N_p B_o + W_p B_w = \\ (N B_{oi} C_i + W B_{wi} C_{wt}) (P_i - P) + W_e \end{aligned} \quad (7)$$

上式有 3 个未知数:原油储量 N 水体大小 W 和水侵量 W_e 。作 $(N_p B_o + W_p B_w)$ 与 $(P - P_i)$ 之间的关系图 (图 2), 利用油藏开发初期没有水侵时 $(N_p B_o + W_p B_w)$ 与 $(P - P_i)$ 之间的直线关系拟合出 $N B_{oi} C_i + W B_{wi} C_{wt}$, 再用其他方法 (如容积法) 求得储量的情况下计算出水体 W 的大小, 然后根据实际点偏离直线的程度计算不同开发时期的水侵量 W_e 。

在塔河缝洞型碳酸盐岩油藏中, 方程 (7) 所反映的油藏实际情况是: 既有与油藏处于同一缝洞中的水体, 也有与油藏不在同一缝洞中的水体。

4 计算实例

4.1 S86 单元

S86 单元 2001 年 11 月投入开发, 共有 8 口生

产井 (图 3)。至 2006 年 7 月, 该单元累积产油 $53.76 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累积产水 $0.19 \times 10^4 \text{ m}^3$, 与较高的产油量相比, 基本不产水。该单元的静压与累积产量之间线性关系很好 (图 4) 压力下降幅度大, 可以认为该单元为封闭的弹性单元。用拟合的直线计算出该单元的弹性产率 $NB_i C_i$ 为 $30\,648 \text{ m}^3/\text{MPa}$, 即缝洞单元的静压每下降 1 MPa 可从该单元采出 $30\,648 \text{ m}^3$ 原油。

4.2 S48单元

S48单元 1997年 10月投入开发, 共有 25口生产井 (图 5)。至 2006 年 7 月, 该单元累积产油 $319.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累积产水 $97.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

该单元的压力与累积产量之间的关系基本分为两段 (图 6): 第一段反映了单元的封闭特性; 第二段表明水侵入单元。用第一段的斜率计算的弹性产率 $NB_i C_i$ 为 $76.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{MPa}$ 。2000 年 11 月 (图 6 中两段交点对应的时间) 水开始侵入单元, 水侵量随时间的变化如图 7。由于 2000 年 11 月之前单元产水很少 (图 8), 可以认为该单元没有封闭水体, 因此该单元为有水侵的弹性驱动单元。图 6 中的水侵开始时间与图 8 中该单元开始大量产水的时间基本一致。

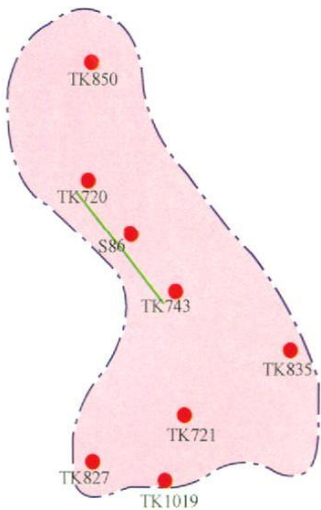


图 3 S86 单元示意图
Fig. 3 Schematic diagram of Unit S86

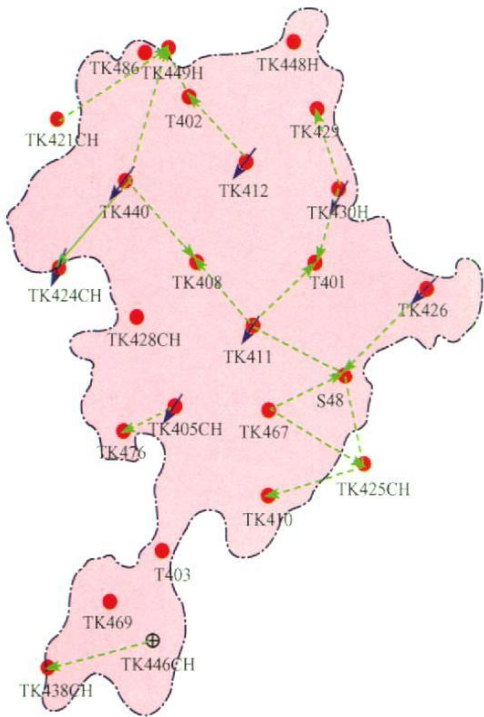


图 5 S48 单元示意图
Fig. 5 Schematic diagram of Unit S48

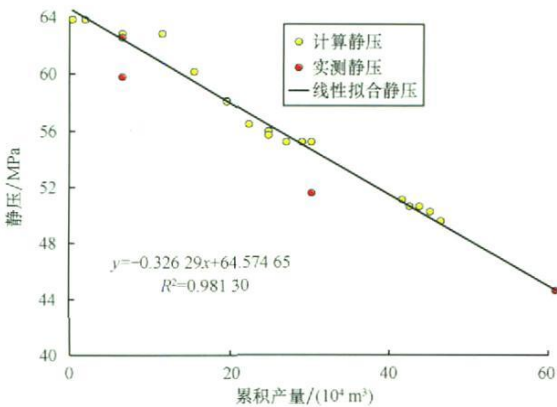


图 4 S86 单元累积产量与静压的关系
Fig. 4 Static pressure vs. cumulate production in Unit S86

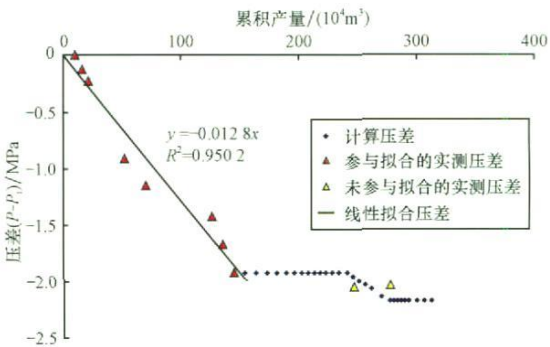


图 6 S48 单元累积产量与压差 (P - P_i) 的关系
Fig. 6 Pressure difference (P - P_i) vs. cumulate production in Unit S48

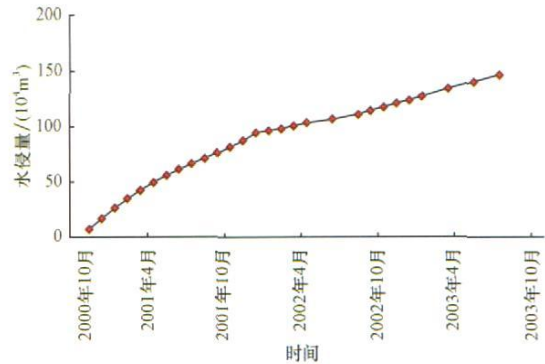


图 7 S48 单元水侵量随时间的变化

Fig. 7 Changes of water invasion volume of Unit S48 over time

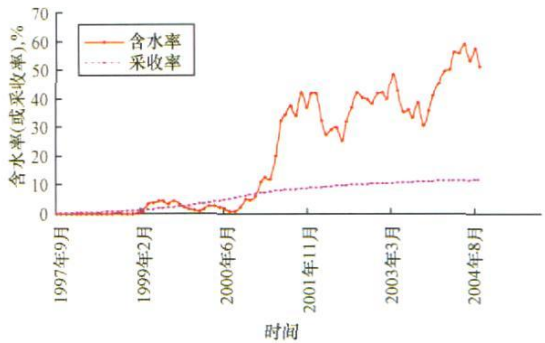


图 8 S48 单元的采收率和含水率

Fig. 8 Recovery rate and water cut in Unit S48

4.3 T606单元

T606单元 2001年 6月投入开发, 共有 7口生产井(图 9)。该单元的静压与累积产量之间线性关系很好(图 10), 可以认为该单元为封闭。但至

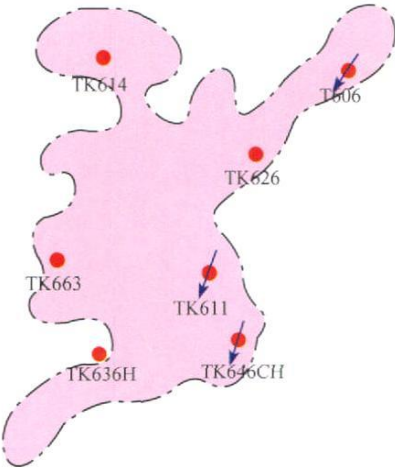


图 9 T606单元示意图

Fig. 9 Schematic map of Unit T606

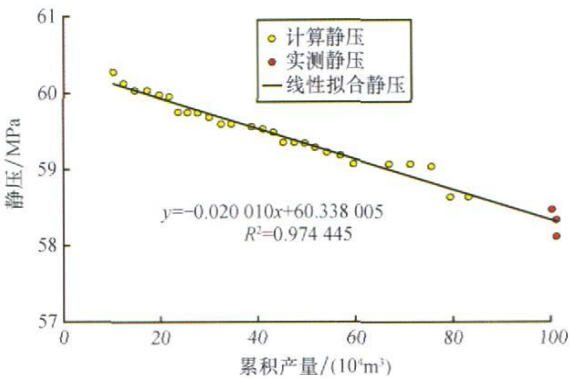


图 10 T606单元累积产量与静压的关系

Fig. 10 Static pressure vs. cumulative production in Unit T606

2006年 7月, 该单元累积产油 $76.71 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累积产水 $11.24 \times 10^4 \text{ m}^3$, 累积产水量不可忽略, 因此认为该单元为有封闭水体的弹性驱动单元。用拟合的直线计算出该单元总的弹性产率为 $499\ 750 \text{ m}^3/\text{MPa}$ 。该单元用静态方法计算出的原油地质储量为 $795.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。根据总弹性产率和原油地质储量, 可计算出封闭水体的大小为 $1\ 765.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 封闭水体的水体倍数 R_{w0} 为 2.39, 水油弹性产率比 E_{w0} 为 1.73。

5 结论

- 1) 把缝洞单元的驱动类型划分为封闭弹性驱动、有水侵的弹性驱动、有封闭水体的弹性驱动及有封闭水体和水侵的弹性驱动 4 种类型, 给出了对应的物质平衡方程。
- 2) 建立了由弹性产率、水侵量和封闭水体的水体倍数等参数组成的缝洞单元能量评价指标体系。
- 3) 根据缝洞单元与累积产量的关系, 对 3 个单元的驱动类型进行了判断, 计算了弹性产率和水侵量等参数。实例计算结果表明能够应用该能量评价方法对缝洞单元的能量进行评价。

参 考 文 献

1 张希明, 朱建国, 李宗宇, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油气藏的特征及缝洞单元划分 [J]. 海相油气地质, 2007, 12(1): 21~24

2 陈志海, 马旭杰, 黄广涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元划分方法研究——以塔河油田奥陶系油藏主力开发区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 847~855

向叠置关系简单等沉积特点的地区利用频谱成像技术识别河道效果较好; 反之, 具有储层较薄、垂向叠置关系复杂等沉积特点的地区由于地震记录在横向上反射振幅差异的减小或横向特征显示间断, 会使识别难度增大。与此同时这些难易特点也可反映出研究区的不同沉积特点, 结合测井等其它地质资料分析, 可以进一步的认识沉积物源、储层纵向变化及平面分布等沉积规律。

参 考 文 献

1 朱庆荣, 张越迁, 于兴河, 等. 分频解释技术在表征储层中的运用[J]. 矿物岩石, 2003 23(3): 104 ~ 108

2 范洪军, 李军, 肖毓祥, 等. 地震分频技术在扇三角洲演化过程研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2007 28(5): 682 ~ 686 692

3 徐丽英, 徐鸣洁, 陈振岩. 利用谱分解技术进行薄储层预测[J]. 石油地球物理勘探, 2006 41(3): 299 ~ 302

4 盛秋红, 肖兰雄. 频谱成像技术在采穴构造储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008 29(1): 141 ~ 145

5 Parvka G, Gridley J, Lopez J. Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge 1999 18(3): 353 ~ 360

6 Peyton L, Bottjer R, Parvka G. Interpretation of incised valleys using new 3-D seismic techniques: A case history using spectral decomposition and coherence[J]. The leading Edge 1998 17(10): 1 294 ~ 1 298

7 赵力及. 利用地震频谱比进行河道砂体预测[J]. 石油实验地质, 2003 25(3): 244 ~ 246

8 Greg Parvka, James Gridley, John Lopez. Interpretational applica-

tions of apectral decomposition in reservoir characterization[J]. The Leading Edge 1999(3): 353 ~ 360

9 Widess M B. How thin is a thin bed? [J]. Geophysics 1973 38(6): 1 173 ~ 1 180

10 Aydin Akan, Luis F. Evolutionary chirp representation of non-stationary signals via Gabor transform[J]. Signal Processing 2001 81(1): 2 429 ~ 2 436

11 Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S-transform[J]. Signal Processing 1996 44(4): 998 ~ 1 001

12 刘丽丽, 赵中禾, 李亮, 等. 变尺度分形技术在裂缝预测和储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008 29(1): 31 ~ 37

13 Pinnegar C R, Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape[J]. Geophysics 2003 68(1): 381 ~ 385

14 John P, Shengjie Sun. Comparison of spectral decomposition methods[J]. EAGE 2006 24(1): 75 ~ 79

15 Yanghua Wang. Seismic time-frequency spectral decomposition by matching Pursuit[J]. Geophysics 2007 72(1): 13-20

16 张尔华, 宋永忠, 陈述民, 等. 松辽盆地扶杨油层河道砂体地震识别方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2004 23(5): 113 ~ 115

17 刘浩杰, 魏国华. 井间地震资料的频谱分析及其与地震资料的联合应用[J]. 油气地质与采收率, 2008 15(5): 56 ~ 58

18 杨林. 地震频谱分解技术应用中有关问题的讨论[J]. 石油物探, 2008 47(4): 405 ~ 409

19 韩喜, 高兴友, 车延信, 等. 利用地震属性沿层分析方法研究河流相沉积环境[J]. 石油地球物理勘探, 2007 42(1): 120 ~ 124

20 胡光义, 王加瑞, 武士尧. 利用地震分频处理技术预测河流相储层[J]. 中国海上油气, 2005 17(4): 237 ~ 239

(编辑 董 立)

(上接第 778 页)

3 张淑品, 陈福利, 金勇. 塔河油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. 石油勘探与开发, 2007 34(2): 175 ~ 180

4 张希明, 杨坚, 杨秋来, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏描述及储量评估技术[J]. 石油学报, 2004 25(1): 13 ~ 18

5 韩革华, 漆立新, 李宗杰, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2006 27(6): 860 ~ 870 878

6 鲁新便. 塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏开发地质研究中的若干问题[J]. 石油实验地质, 2003 25(5): 508 ~ 512

7 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征[J]. 石油与天然气地质, 2005 26(5): 634 ~ 640 673

8 胡广杰, 杨庆军. 塔河油田奥陶系缝洞型油藏连通性研究[J]. 石油天然气学报, 2005 27(2): 227 ~ 229

9 皇甫红英, 阳国进, 王玲. 碳酸盐岩中定容体的识别[J]. 新疆地质, 2004 22(1): 117

10 康志宏, 魏历灵. 动态评价技术在塔河碳酸盐岩缝洞型油气藏中的应用[J]. 天然气工业, 2006 26(08): 53 ~ 55

11 杨宇, 杨彦军, 蒋宏伟, 等. 利用类干扰试井判断塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油藏的井间连通性[J]. 试采技术, 2007 28(1): 21 ~ 23

12 肖玉茹, 何峰煜, 孙义梅. 古洞穴型碳酸盐岩储层特征研究——以塔河油田奥陶系古洞穴为例[J]. 石油与天然气地质, 2003 24(1): 75 ~ 86

13 Lucia F J, Kearns C, Jennings J W, Jr. Carbonate reservoir characterization[J]. J Petrol Technol 2003 55(6): 70 ~ 72

14 Guan L, Wang S, Zhu H. Prediction of a fracture cavern system in a carbonate reservoir: a case study from Tahe oil field China[J]. The Leading Edge 2006 25(11): 1 396 ~ 1 400

(编辑 李 军)