

缝洞单元类型快速识别方法

肖阳¹,何文¹,罗慎超²,宋军正³,杨辉⁴,陈萍⁴

(1.成都理工大学能源学院,四川成都610059;2.中国石油塔里木油田分公司开发事业部,新疆库尔勒841000;
3.中国石油川庆钻探工程分公司钻采技术研究院,四川广汉710018;4.中国石油塔里木油田公司,新疆库尔勒841000)

摘要:为了对碳酸盐岩储集体类型进行快速划分和识别,针对碳酸盐岩缝洞单元,根据典型井的静态资料,明确缝洞组合模式,选择有代表性的岩心造洞并进行物理模拟实验,分析裂缝-孔洞型单元、孤立溶洞型单元和有基质供液的溶洞型单元的流动特征。通过噪声处理和地层综合压缩系数分析对自喷期流动特征曲线进行校正。根据塔里木油田英买2区块自喷期油压曲线、累积压降-累积产液量曲线、漏失和放空等动态资料以及缝洞单元雕刻图等静态资料,综合压恢试井解释资料,认为英买2区块40口井缝洞单元可划分为4种类型:有基质供液的溶洞型单元、裂缝-孔洞型单元、孤立溶洞型单元和其他类别单元。该方法可应用于今后油藏开发过程中缝洞单元的快速、准确识别。

关键词:碳酸盐岩 缝洞单元 储集体特征 自喷曲线 物理模拟实验

中图分类号:TE122.2²

文献标识码:A

A fast recognition method of fractured-vuggy unit type

XIAO Yang¹, HE Wen¹, LUO Shenchao², SONG Junzheng³, YANG Hui⁴, CHEN Ping⁴

(1.College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu City, Sichuan Province, 610059, China; 2.Development Department, PetroChina Tarim Oilfield Branch Company, Kolar, Xinjiang, 841000, China; 3.Drilling and Production Technology Research Institute, PetroChina Chuanqing Drilling Engineering Branch, Guanghan City, Sichuan Province, 710018, China; 4.PetroChina Tarim Oilfield Company, Kolar, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: In order to quickly classify and distinguish carbonate reservoir types, the fractured-vuggy combination pattern of the fractured-vuggy carbonate units was determined based on the data of typical well. Typical cores were selected for hole-making and was applied to physical simulation experiment, and the flow characteristics of the fractured-vuggy type unit, isolated cave type unit and cave type unit with fluid supply by matrix were analyzed. Noise processing and integrated compressibility coefficient analysis was done to correct the flow characteristics curves at flush stage. Based on the oil-pressure curve, cumulative pressure drop vs. cumulative liquid production curve, dynamic data of leakage and venting and static data of sculpture of fractured-vuggy unit at the flush stage in the Yingmai2 block, Tarim Oilfield, the fractured-vuggy units in 40 wells of Yingmai2 block can be classified into 4 types combined with pressure buildup well test data. The cave type units with fluid supply by matrix, fractured-vuggy type units and isolated cave type units and other type units. This method can be applied to the quick recognition of the fractured-vuggy units in the future development of reservoir.

Key words: carbonate rocks; fractured-vuggy unit; reservoir characteristics; flow curve; physical simulation experiment

缝洞单元指碳酸盐岩油藏内,周围被相对致密 或渗透性较差的隔挡层(体)遮挡,以溶蚀界面或断

收稿日期:2018-07-13。

作者简介:肖阳(1980—),男,四川成都人,副教授,博士,从事非常规油气藏储层改造与数值模拟方面研究。联系电话:18030876087, E-mail:9640709@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金“多尺度多场应力耦合致密砂岩体积改造裂缝评价模型研究”(51504042),国家科技重大专项“鄂南致密低渗油藏水力压裂裂缝起裂及扩展规律”(2016ZX05048-001-04-LH)和“水平井压裂设计优化系统”(2016ZX05023-001),四川省教育厅基金重点项目“自流注水关键节点仿真及流动耦合计算模型研究”(18ZA0063)。

裂为边界,由裂缝网络相互串通,由溶孔、溶洞组合而成的流体连通体^[1-2]。它强调了流体连通性及渗流差异,每个单元具有独立的压力系统、压力连通关系及相似的流体性质,是对储集单元的进一步细化,是碳酸盐岩油藏最小的开发单元。塔里木油田英买2区块储层类型以裂缝-孔洞型为主,部分层段孔洞较发育,油水关系复杂,流体的分布受缝、洞储集体的控制。对于碳酸盐岩油藏的开发,缝洞单元划分极为关键,可指导油藏开发的整个过程^[3-5]。李阳采用井震联合、动静结合手段,识别了塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体的缝洞单元,并根据缝洞单元储量规模和天然能量进行分类评价^[6]。程倩等研究认为缝洞型碳酸盐岩油藏以岩溶、构造运动形成的溶洞、溶蚀孔洞和裂缝系统为主^[7]。邓兴梁等在有井控制的地区分析了井间连通性,然后结合生产动态、常规解析试井、流体性质和数值试井等多学科资料确定缝洞单元边界^[8]。金强等通过岩溶地质分带、不同岩溶带缝洞成因结构和岩溶缝洞充填物成因规律研究,提出四步法用以识别缝洞单元^[9]。

对于缝洞特征较明显的开发单元,利用地震、岩心、测井等静态资料有时很难精确描述其主导储层类型和缝洞组合模式^[10-12],因此需要结合物理模拟实验、生产动态资料及试井等测试手段进行综合判断,为缝洞单元划分评价、各类数学模型建立及生产动态分析提供地质模型基础。

1 物理模拟实验

根据典型井的静态资料,选择有代表性的岩心造洞并进行物理模拟实验,研究典型缝洞体对缝洞型碳酸盐岩油藏介质流动规律的影响,主要考虑裂缝-孔洞型单元、孤立溶洞型单元、有基质供液的溶洞型单元3种缝洞组合模式(图1)。



图1 缝洞组合模式

Fig.1 Fractured-vuggy combination pattern

根据有基质供液的溶洞型单元的结构特征,在2块不同物性的全直径岩心上打出相同体积的空腔,并对岩心的外边界进行封闭处理,建立有基质供液的溶洞型单元概念模型,用以模拟不同窜流能

力的基质。实验流体为原油,其地面粘度为27.6 mPa·s;实验温度为常温;实验室内压力按压力表上的数值记录,通过真空泵为溶洞加压至原始地层压力,用计算机记录t时刻溶洞的压力;在计量系统的出口端采用定制开关控制采油速度;累积产液量由电子天平采集。实验流程如图2所示。

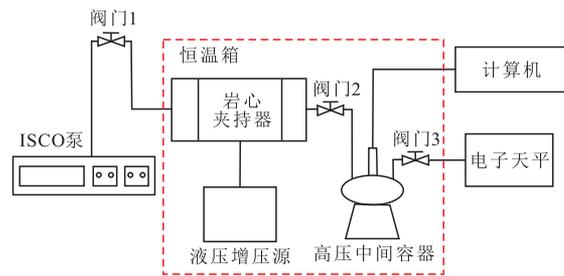


图2 实验流程

Fig.2 Experiment procedures

模拟现场小油嘴生产过程,在小压差排液的前提下,得到缝洞单元的流动特征,有基质供液的溶洞型单元的油压接近单指数递减,自喷期累积压降-累积产液量曲线前期呈现直线段特征,后期为较明显的上翘段(图3)。上翘的原因是能量供给,来源于溶洞本身的弹性能量和碳酸盐岩基质的窜流供液能量。压力变化反映溶洞的属性 and 溶洞内油的体积,可为判别溶洞类型提供一定依据。

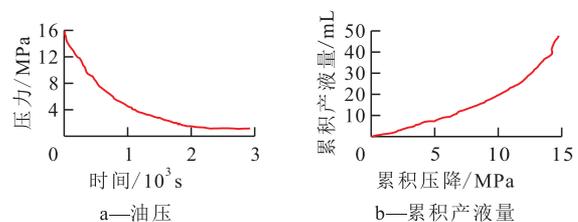


图3 有基质供液的溶洞型单元自喷期流动特征

Fig.3 Flow characteristics at flush stage of cave type unit with fluid supply by matrix

采用相同的方法进行裂缝-孔洞型单元和孤立溶洞型单元的流动实验,结果表明:裂缝-孔洞型单元的油压呈双指数递减规律,累积压降-累积产液量曲线前期呈直线段,后期有明显上翘(图4);孤立溶洞型单元的油压呈双指数递减规律,累积压降-累积产液量曲线近似直线(图5)。

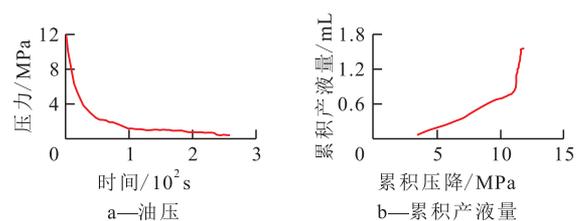


图4 裂缝-孔洞型单元自喷期流动特征

Fig.4 Flow characteristics at flush stage of fractured-vuggy type unit

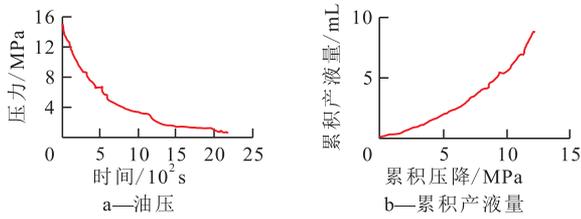


图5 孤立溶洞型单元自喷期流动特征
Fig.5 Flow characteristics at flush stage of isolated cave type unit

2 自喷期流动特征曲线综合校正

2.1 噪声处理

在自喷初期,塔里木油田英买2区块Y井工作制度变化造成数据振荡较严重(图6),利用低频去噪技术进行去噪处理,根据分频和局部的分析能力,有效去除随机干扰,在去除干扰点的同时,仍能保留原曲线的特征分析点,使曲线更具可靠性(图7)。

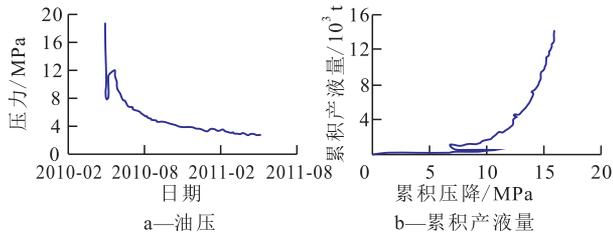


图6 处理前Y井累积压降-累积产液量和油压曲线
Fig.6 Cumulative pressure drop vs. cumulative liquid production curve and oil-pressure curve before processing

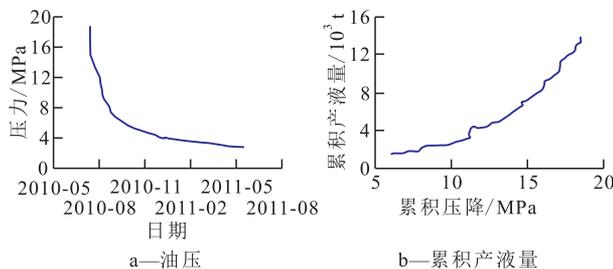


图7 处理后Y井累积压降-累积产液量和油压曲线
Fig.7 Cumulative pressure drop vs. cumulative liquid production curve after processing

具体来说,低频去噪技术是运用一个低阶多项式对现场的数据进行拟合,如果少数数据点不符合多项式,就可将其判断为差值。为避免这些差值对原本曲线形态造成影响,采用前向差分方法对差值进行处理,期间用到的数据点已经过处理,是可靠的。数据中夹杂着各种随机噪声,它们混叠在真实数据中,所以要对数据进行降噪处理。经过经验模态分解并与原始数据对比,将差值直接剔除,对疑似的差值保留,通过曲线对比再去除疑似差值,保

留不是差值的数据点。

2.2 地层综合压缩系数综合分析

在有基质供液的溶洞型单元和裂缝-孔洞型单元的累积压降-累积产液量曲线中,后期呈上翘趋势,为了明确上翘与地层综合压缩系数的关系进行了一系列分析。

根据未饱和封闭性系统弹性油藏方程式,得累积产液量为

$$N_p = \frac{VB_{oi}C_t[p_i - p(t)]}{B_o} \quad (1)$$

生产一段时间的累积产液量为

$$N_{p1} = \frac{VB_{oi}C_{t1}[p_i - p(t)]}{B_o} \quad (2)$$

将式(1)与式(2)相比得

$$\frac{N_{p1}}{N_p} = \frac{C_{t1}}{C_t} \quad (3)$$

日产液量为

$$q(t) = hwK_f(p_i - p_{wf})e^{-\frac{hwK_f B_o}{\mu L VB_{oi}C_t} t} \quad (4)$$

根据测得的中深静压,对日产液量曲线进行拟合,得出地层压力随时间的变化曲线,再结合地层综合压缩系数随地层压力的变化规律,得到每个时间段的地层综合压缩系数。因岩石压缩系数在本次研究中变化不大,所以不予考虑。

根据地层综合压缩系数对英买2区块的1口采油井的累积压降-累积产液量曲线进行修正(图8),结果表明,随着累积压降逐渐增大,累积压降-累积产液量曲线前期呈直线段,后期有上翘趋势,考虑地层综合压缩系数后,上翘的趋势略微变缓,结果更为精确,上翘的主要原因还是外部有基质供应。

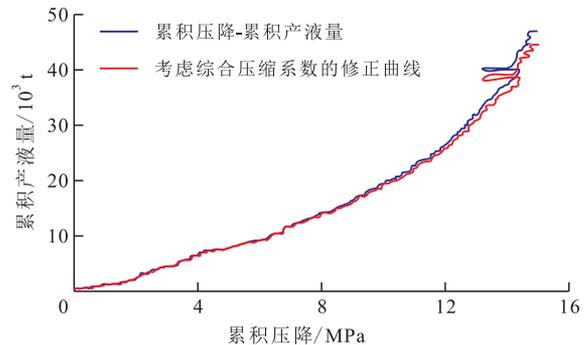


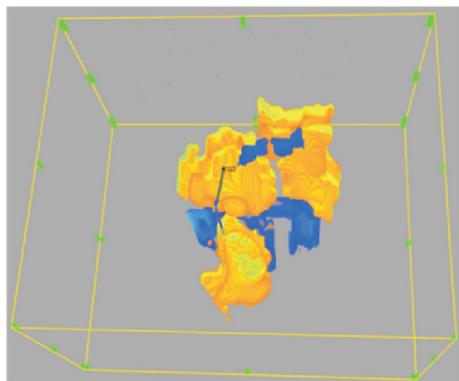
图8 考虑综合压缩系数对比
Fig.8 Comparison of integrated compressibility coefficient

3 缝洞单元特征动静态对比与识别

3.1 有基质供液的溶洞型单元

A井是英买2区块西北部的一口高产井,钻至

井深6 056.98 m发生井漏,共漏失钻井液554 m³,无放空。根据A井缝洞单元雕刻图(图9),将其测井解释为洞穴型和裂缝-孔洞型,单元类型定义为洞穴型。综合以上资料,将A井储层初步解释为缝洞型及裂缝-孔洞型的复合型储层。结合A井自喷初期生产动态曲线(图10)可以看出,A井自喷期油压递减虽然不符合单指数递减规律,却接近单指数曲线特征,其累积压降-累积产液量曲线前期呈直线段特征,后期略微上翘,完全符合有基质供液的溶洞型单元生产井的生产特征;其动静态的识别结果都与有基质供液的溶洞型单元非常吻合。



串珠: $216 \times 10^4 \text{ m}^3$ 单元: $1\,700 \times 10^4 \text{ m}^3$
黄色部分代表溶洞,蓝色部分代表裂缝

图9 A井缝洞单元雕刻图

Fig.9 Sculpture about fractured-vuggy unit in Well A

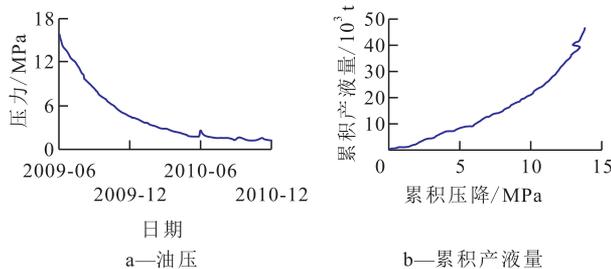


图10 A井自喷初期生产动态曲线

Fig.10 Production performance curve of Well A at initial flush stage

A井缝洞单元概念模型的试井解释结果为以圆形为边界的变井储径向复合油藏,内区渗透率高达4 420 mD,说明内区为溶洞;而外区渗透率为44 mD,说明全是基质。进一步验证A井缝洞单元是典型的有基质供液的溶洞型单元(图11)^[11]。

3.2 裂缝-孔洞型单元

B井是英买2区块西部的一口中产井,钻井过程中无漏失放空。从B井缝洞单元雕刻图(图12)可见,串珠之间有明显的裂缝连接,数块取心资料的解释结果是B井奥陶系一间房组裂缝较发育^[13]。综合以上资料,将B井储层初步解释为裂缝型和裂缝-孔洞型复合型储层。结合B井自喷初期生产动

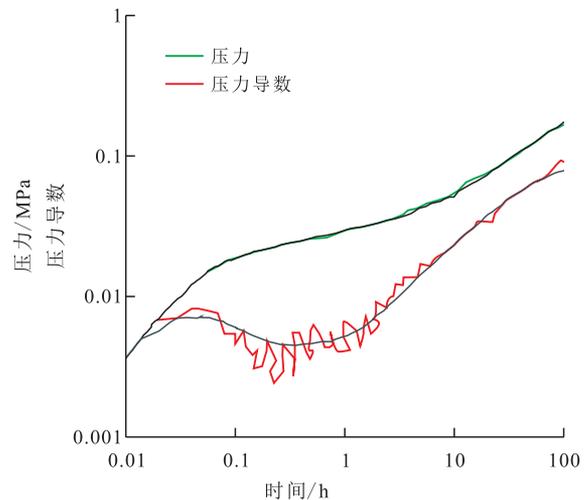
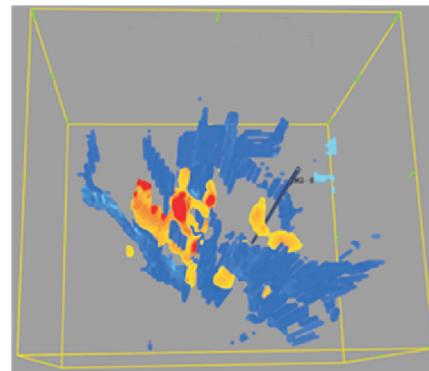


图11 A井时间-压力双对数拟合

Fig.11 Double logarithmic fitting between time and pressure of Well A



串珠: $80.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 单元: $622 \times 10^4 \text{ m}^3$
黄色部分代表溶洞,蓝色部分代表裂缝

图12 B井缝洞单元雕刻图

Fig.12 Sculpture about fractured-vuggy unit in Well B

态曲线(图13)可以看出,B井自喷期油压递减规律不符合单指数递减规律,但接近双指数曲线特征,其累积压降-累积产液量曲线前期呈现直线段特征,后期呈现略微上翘,完全符合裂缝-孔洞型单元生产井生产特征。因此其动静态认识更接近于裂缝-孔洞型单元。

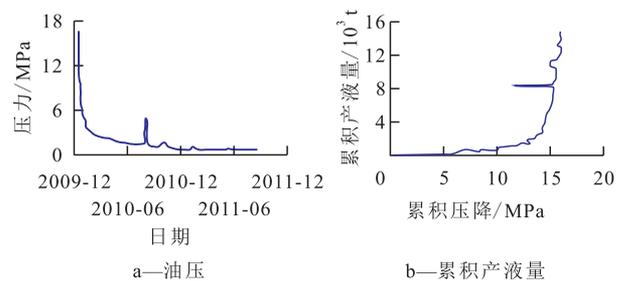


图13 B井自喷初期生产动态曲线

Fig.13 Production performance curve of Well B at initial flush stage

B井单元概念模型试井解释结果为无限大边界的定井储双重介质油藏,进一步验证B井缝洞单元

是典型的裂缝-孔洞型单元。试井曲线裂缝特征明显,基本无较大孔洞显示,这与缝洞雕刻储量(洞穴型储量为 0.16×10^4 t,裂缝-孔洞型储量为 4.64×10^4 t)解释成果也是相匹配的(图14)。

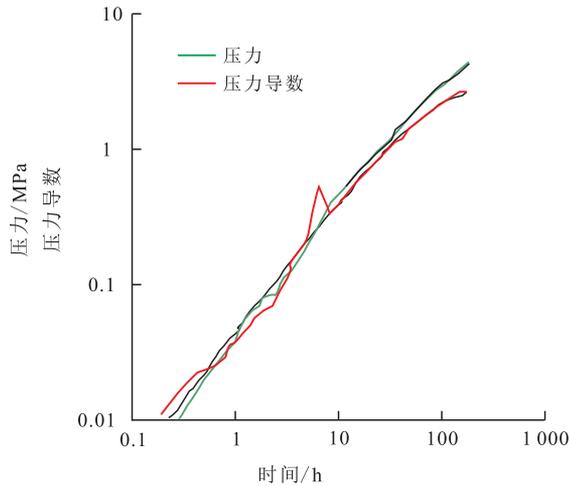
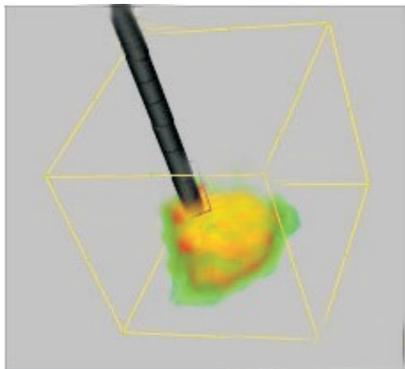


图14 B井时间-压力双对数拟合

Fig.14 Double logarithmic fitting between time and pressure of Well B

3.3 孤立溶洞型单元

C井是英买2区块西北部的一口高产井,钻井过程中放空12.03 m,漏失量为 69.6 m^3 。从C井缝洞单元雕刻图(图15)判定储层类型为洞穴型。结合C井自喷初期生产动态曲线(图16)可见,C井自喷初



黑色部分为井筒,黄色和红色部分说明孔隙度大代表洞,绿色部分说明孔隙度小代表基质

图15 C井缝洞单元雕刻图

Fig.15 Sculpture about fractured-vuggy unit in Well C

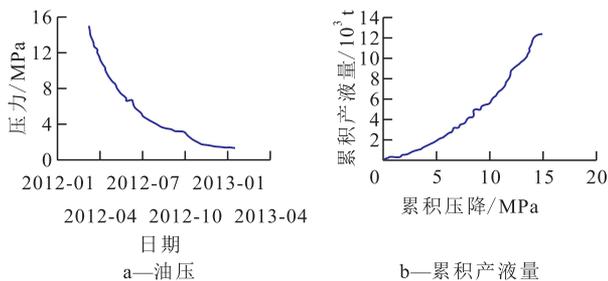


图16 C井自喷初期生产动态曲线

Fig.16 Production performance curve of Well C at initial flush stage

期油压递减规律近似于双指数递减,其累积压降-累积产液量曲线呈逐渐上升趋势,在后期有微弱上翘,外区有少量的基质供液,由于其量很小,将该缝洞单元定义为孤立溶洞型。

C井单元概念模型的试井解释结果(图17)为无限大边界的井储和表皮特征的复合油藏,进一步验证C井缝洞单元是典型的孤立溶洞型单元。由试井解释还能看出,C井内区范围较大为343 m,渗透率为3290 mD,远高于外区渗透率9.53 mD,因此孤立溶洞型特征明显,外围储层供液能力存在不足,储集规模不大。

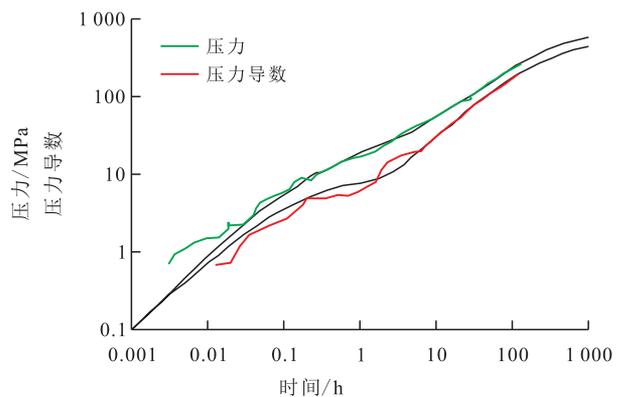


图17 C井时间-压力双对数拟合

Fig.17 Double logarithmic fitting between time and pressure of Well C

经过对3种类型井的研究与分类,可利用自喷初期生产曲线、漏失和放空资料等动态资料以及缝洞单元雕刻图静态资料,对碳酸盐岩油藏进行初步分类,再结合试井曲线拟合出模型结果进行验证。

4 识别方法验证和应用

为了验证该识别方法的准确性,对英买2区块40口井的油压随时间的递减曲线进行分类,根据其自喷初期压降曲线和累积压降-累积产液量曲线可划分为(图18):有基质供液的溶洞型单元、裂缝-孔洞型单元、孤立溶洞型单元和其他类别单元4种类型,其中有6口井符合裂缝-孔洞型单元的自喷期流动特征,有14口井符合有基质供液的溶洞型单元和孤立溶洞型单元的自喷期流动特征,剩余的井因无规律归为其他类别单元。

对该区块21口注水井(表1)静态雕刻资料和自喷初期的压降曲线和累积压降-累积产液量曲线特征进行对比可见,自喷曲线特征大部分与静态雕刻资料相符,只有YM2-3-4C, YM2-1H, YM2-H13JS和YM2-H18井有差别。YM2-3-4C井,静态资料解

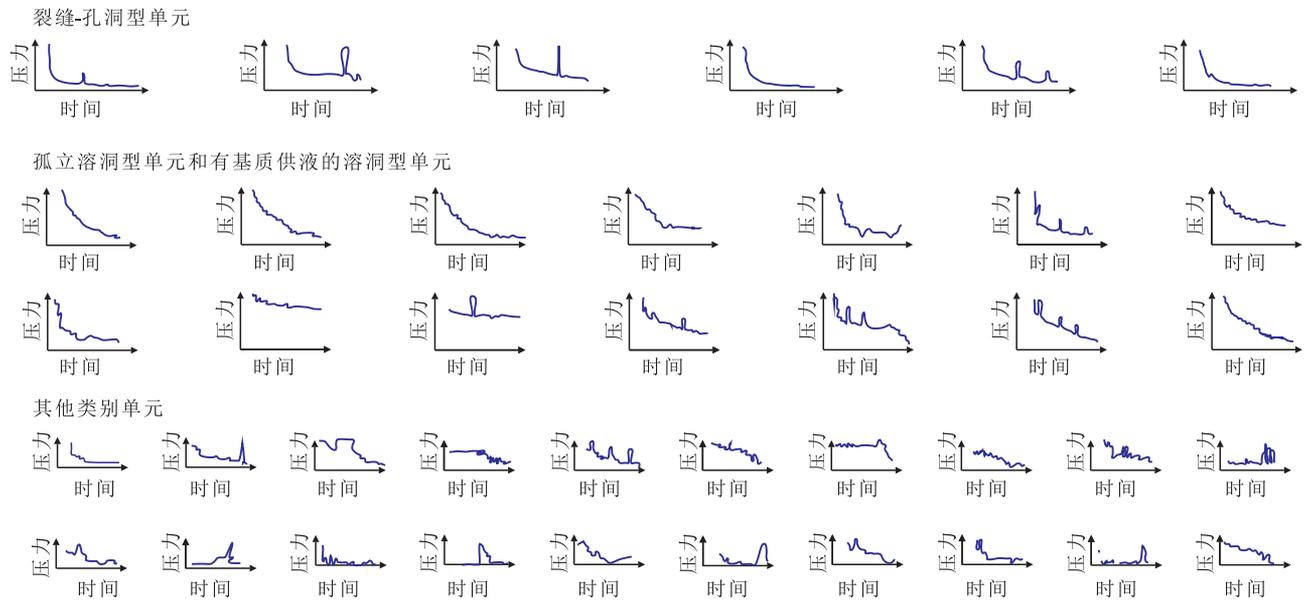


图 18 油压随时间递减规律

Fig.18 Decrease law of oil pressure with time

表 1 注水井动静态解释结果

Table1 Dynamic and static explanation for injection wells

井号	注水量/m ³	替油量/t	储层类型	自喷曲线特征	井号	注水量/m ³	替油量/t	储层类型	自喷曲线特征
YM2-16	32 820	28 374	洞穴型	洞穴型	YM204	34	0	裂缝-孔洞型	裂缝-孔洞型
YM2-15	29 985.7	18 732	洞穴型	洞穴型	YM2-H30	1 043	0	裂缝-孔洞型	弱裂缝-孔洞型
YM2-20	31 049	17 095	洞穴型	洞穴型	YM2-26-H1	124	0	裂缝-孔洞型	弱裂缝-孔洞型
YM2-3-7	7 967	5 071	洞穴型	弱洞穴型	YM2-3-4C	7 682.7	0	洞穴型	裂缝-孔洞型
YM2-8	14 058	3 954	裂缝-孔洞型	裂缝-孔洞型	YM2-1H	5 012	0	裂缝-孔洞型	杂乱
YG2	62 684	3 402	洞穴型	洞穴型	YM2-H13JS	7302	2 581	裂缝-孔洞型	杂乱
YM2-H26	5 585	2 921	裂缝-孔洞型	裂缝-孔洞型	YM2-H18	370	188	裂缝-孔洞型	无
YM2-12-6	3 044	1 746	裂缝-孔洞型	裂缝-孔洞型	YM2-2			裂缝-孔洞型	弱洞穴型
YM2-14	9 403	2 135	裂缝-孔洞型	裂缝-孔洞型	YM2-4			裂缝-孔洞型	洞穴型
YM2-12	2 439	2 007	裂缝-孔洞型	裂缝-孔洞型	YM2-6			裂缝-孔洞型	洞穴型
YM2-3-5C	10 020	10	裂缝-孔洞型	裂缝孔洞型					

释的单元类型是洞穴型,而通过自喷曲线特征得到的却是裂缝-孔洞型,通过对其注水替油后发现并没有油产出,所以该井更符合自喷曲线特征所判断的裂缝-孔洞型。

在该区块 YM2-2, YM2-4 和 YM2-6 井中,静态资料将其都解释为裂缝-孔洞型,可通过自喷初期生产曲线、漏失和放空的数据等动态资料将其定义为洞穴型,所以下一步可对其进行注水替油,看是否有油被替出。如果该井缝洞单元类型是洞穴型,则注水替油的效果会十分明显。如果缝洞单元类型解释为裂缝-孔洞型,自喷曲线解释为洞穴型,但注水替油后替油效果明显,置换率很高,则更加证明该方法的准确性;如果缝洞单元类型和自喷期曲线特征都解释为裂缝-孔洞型,就没有必要对它实

施注水替油。该方法也可对碳酸盐岩油藏注水替油开发提供一定的理论依据。

但该方法也有缺陷,例如 YM2-H18 井,一开始就由电泵产油,所以无法通过自喷曲线判断其缝洞单元类型。具体判断时应结合动、静态方法,加上试井解释结果,对缝洞单元类型进行精确的评价和解释。

5 结论

缝洞单元类型识别是一种在物理模拟实验流动特征基础上,结合储层预测进行储集体特征判断的方法。通过对缝洞单元流动规律实验研究,了解溶洞内流体的流动规律,验证理论模型的准确性。

具有缝洞特征的碳酸盐岩油藏储层类型性质和井间连通情况非常复杂,需充分综合自喷期油压和累积产液量变化规律、压恢试井解释成果等缝洞单元的动静态资料,结合勘探、开发等多种手段,进行缝洞单元描述的动静态反演,最终确定缝洞单元类型。

该方法可快速且较准确地判断缝洞单元类型,与试井解释资料有较高的相符性。可广泛应用于碳酸盐岩油藏,并可对其是否进行注水替油进行评价,后期可结合连通单元的论证确定注水驱油或注水替油方式。

符号解释:

N_p ——累积产液量, t; V ——溶洞体积, m^3 ; B_{oi} ——原始的原油体积系数; C_r ——原油压缩系数; p_i ——原始地层压力, MPa; $p(t)$ —— t 时刻地层压力, MPa; t ——时间, d; B_o ——生产一段时间后的原油体积系数; N_{pi} ——经地层综合压缩系数校正后的累积产液量, t; C_{ui} ——地层综合压缩系数; $q(t)$ ——日产液量, t/d; h ——溶洞高度, m; w ——裂缝宽度, cm; K_r ——地层水渗透率, mD; p_{wf} ——井底流压, MPa; μ ——流体粘度, mPa·s; L ——溶洞长度, m。

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.
ZHANG Ximing, ZHU Jianguo, LI Zongyu, et al. Ordovician carbonate fractured-vuggy reservoir in Tahe Oilfield, Tarim Basin: Characteristics and subdivision of fracture-vug units [J]. Marine Oil and Gas Geology, 2007, 12(1): 21-24.

[2] 宋化明,刘建军.塔河油田四区缝洞性油藏缝洞单元划分方法研究[J].石油地质与工程,2011,25(3):61-64.
SONG Huaming, LIU Jianjun. Study on fracture-cavity reservoir fracture-cavity unit division method in Tahe oilfield4 block [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(3): 61-64.

[3] 张希明.新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J].石油勘探与开发,2001,28(5):17-22.
ZHANG Ximing. The characteristics of Lower Ordovician fissure-vug carbonate oil and gas pools in Tahe oil field, Xinjiang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(5): 17-22.

[4] 黄孝特.碳酸盐岩裂缝-溶洞型油气藏开发技术探讨[J].石油实验地质,2002,24(5):446-449.
HUANG Xiaote. An approach on the development technologies of fissure-karst cave-typed hydrocarbon pools in carbonate rock [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(5): 446-449.

[5] 杨敏.塔河油田4区岩溶缝洞型碳酸盐岩储层井间连通性研究

[J].新疆地质,2004,22(2):196-199.
YANG Min. Interwell communication in dissolved fractured-cavity type carbonate reservoir at Block4 in the Tahe oil fields [J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(2): 196-199.

[6] 李阳.塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞型储集体识别及定量表征[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(1):1-7.
LI Yang. Ordovician carbonate fracture-cavity reservoirs identification and quantitative characterization in Tahe Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(1): 1-7.

[7] 程倩,李江龙,刘中春,等.缝洞型油藏分类开发[J].特种油气藏,2012,19(5):93-96.
CHENG Qian, LI Jianglong, LIU Zhongchun, et al. Separate development of fracture and karst cave reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 93-96.

[8] 邓兴梁,刘俊锋,裴广平,等.碳酸盐岩油气藏缝洞单元多学科综合划分方法研究——以塔里木盆地轮古11井区为例[J].海相油气地质,2013,18(2):72-78.
DENG Xingliang, LIU Junfeng, PEI Guangping, et al. Research on multi-subject integrated division of fracture and cave units in carbonate reservoirs: A case of Well LG-11 area in Lungu Oil Field, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(2): 72-78.

[9] 赵春明,张建民,李祖兵.渤中28-1油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及主控因素[J].大庆石油地质与开发,2017,36(1):27-34.
ZHAO Chunmin, ZHANG Jianmin, LI Zubing. Characteristics and main controlling factors for the Ordovician carbonate reservoir in Bozhong28-1 Oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2017, 36(1): 27-34.

[10] WANG Xisha, YI Xiaoyan, CHEN Qing, et al. Interwell connectivity in fracture-cavity type carbonate reservoir: An example from S48 well block [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(1): 126-129.

[11] 肖阳,江同文,冯积累,等.不关井试井分析在桑南西生产动态分析中的应用[J].油气井测试,2012,21(1):19-21.
XIAO Yang, JIANG Tongwen, FENG Jilei, et al. Application of well test analysis without closing well for production performance in the Sang Nan oil field [J]. Well Testing, 2012, 21(1): 19-21.

[12] 刘冉,霍飞,王鑫,等.普光气田下三叠统飞仙关组碳酸盐岩储层特征及主控因素分析[J].中国石油勘探,2017,22(6):34-46.
LIU Ran, HUO Fei, WANG Xin, et al. Characteristics and main controlling factors of Lower Triassic Feixianguan Formation carbonate reservoir in Puguang gas field [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 34-46.

[13] 许闯麟.碳酸盐岩裂缝-孔隙性地层钻井液漏失模型[J].特种油气藏,2016,23(6):133-135.
XU Kailin. Mud loss model in carbonate fracture-pore formation [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(6): 133-135.