

文章编号:1009-9603(2021)04-0086-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.04.010

基于物质平衡的超深断溶体油藏 弹性驱产能主控因素分析

顾浩¹,康志江¹,尚根华¹,郑松青¹,朱桂良¹,张云²,朱现胜²,朱莲花²

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083; 2.中国石化西北油田分公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:以塔里木盆地Q单元为例,基于物质平衡原理,从储量、能量、流度3大方面分析超深断溶体油藏弹性驱产能主控因素,解释不同断裂级次弹性驱产能差异。结果表明:超深断溶体油藏弹性驱产能主控因素包括缝洞储集体规模、地层弹性能量和流体流动能力,这3个因素整体均呈主干断裂大于分支断裂、分支断裂大于次级断裂的特征;弹性驱单井累积产油量、日产油量、阶段累积产油量均与单井控制储量呈强线性关系;单井累积产油量和单井控制储量与初始地层压力乘积在对数坐标上是一条斜率近似为1的直线;综合弹性压缩系数、缝洞储集体规模对累积产油量影响大于初始地层压力影响;流体流动能力越强,平均单井日产油量越高;要提高超深断溶体油藏弹性驱产能,早期井位部署应优选规模大、地层破碎程度高的缝洞储集体,开发中后期要尽量提高单井控制储量。

关键词:断溶体油藏;弹性驱;产能;物质平衡原理;单井控制储量;综合弹性压缩系数

中图分类号:TE344

文献标识码:A

Analysis of main controlling factors for elastic flooding productivity of ultra-deep fault-karst reservoirs based on material balance

GU Hao¹, KANG Zhijiang¹, SHANG Genhua¹, ZHENG Songqing¹,
ZHU Guiliang¹, ZHANG Yun², ZHU Xiansheng², ZHU Lianhua²

(1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing City, 100083, China*; 2. *Northeast Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China*)

Abstract: With the Q Oilfield in the Tarim Basin as an example, according to the principle of material balance, the main controlling factors behind elastic flooding productivity of ultra-deep fault-karst reservoirs are analyzed from the reserves, energy, fluidity 3 aspects to explain the difference in elastic flooding productivity at different fault orders. The results show that the main controlling factors include the scale of fracture-cavity reservoirs, elastic energy of formations and flow capacity of fluids. These three factors, on the whole, all play a greater role at the main fault than at the branch fault and contribute more at the branch fault than at the secondary fault. There is a strong linear relationship of single-well controlled reserves with cumulative oil production, daily oil production, and staged cumulative oil production of a single well by elastic flooding. The products of initial formation pressure with the cumulative oil production and controlled reserves of a single well manifest as a straight line with a slope of approximately 1 on the logarithmic coordinate. The comprehensive elastic compressibility coefficient and the fracture-cavity reservoir scale have a greater influence on cumulative oil production than initial formation pressure. The stronger fluid flow capacity indicates the higher average daily oil production per well. For the greater elastic flooding productivity of ultra-deep fault-karst reservoirs, the fracture-cavity reservoirs with a large scale and a high level of formation breakage should be preferred in the early deployment of well locations, and single-well controlled reserves should be maximized in the middle and late stages of development.

收稿日期:2021-01-21。

作者简介:顾浩(1989—),男,湖北黄冈人,副研究员,博士,从事碳酸盐岩油藏开发工作。E-mail:guhao.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金企业联合基金“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究(U19B6003)”,中国石化科技部项目“断溶体油藏产能变化规律及优化”(P19026-3)和“顺北断溶体油藏建模数模与开发方式研究”(P20064-3)。

Key words: fault-karst reservoirs; elastic flooding; productivity; material balance principle; single-well controlled reserves; comprehensive elastic compressibility coefficient

近年来,中国石化、中国石油在塔里木盆地油气勘探中陆续获得重大突破,揭开了超深(目的层埋深大于6 000 m)碳酸盐岩断溶体油藏滚动勘探开发序幕^[1-4],截至2019年底,均已初步建成年产油百万吨级产能阵地。超深断溶体油藏是一种特殊的缝洞型油藏,具有断控岩溶特征,深大走滑断裂带对奥陶系碳酸盐岩具有控储控藏作用^[5-8],为提高油井建产率及产能,矿场主要沿断裂带布井且井眼轨迹直穿优质缝洞储集体,在目的层发生放空漏失后就地完井。超深断溶体油藏地层压力高、弹性能量强,为充分利用天然能量,早期均采用自喷方式开采,但由于水体不活跃,地层能量下降快,油井产量逐渐递减,符合弹性驱典型特征。

作为一种断控缝洞型油藏,超深断溶体油藏弹性驱产能受断裂级次影响大:主干断裂缝洞储集体发育、地层能量下降相对较慢、流体流动能力强,单井产能高;分支断裂次之;次级断裂产能低,甚至未建产,这些仅为矿场定性认识,缺乏定量分析。事实上,超深断溶体油藏弹性驱产能影响因素多,前人主要基于储集体地震反射特征,通过井震结合定性分析单井产能^[9],能较好阐述产能与储层匹配关系,但没有从本质上分析弹性驱产能主控因素。

以塔里木盆地Q单元为例,首先分析超深断溶体油藏弹性驱产能典型特征,重点对比不同断裂级次弹性驱产能差异,其次基于物质平衡原理研究缝洞储集体规模、地层弹性能量和流体流动能力对超深断溶体油藏弹性驱产能影响,解释不同断裂级次弹性驱产能差异,并简要介绍工程因素影响,为超深断溶体油藏井位部署、产能预测、油井增产措施调整等提供一定理论支撑。

1 区块概况

塔里木盆地Q单元属于典型超深断溶体油藏,整体发育北东向走滑断裂体系,平面上包含一条长度约为25 km主干断裂、若干条分支断裂和次级断裂,主要活动期次为加里东中晚期—海西早期,剖面上断裂具有穿层性,向下断穿寒武系,主要目的层为中奥陶统一间房组(O_{2j})和鹰山组(O_{1-2y}),目的层顶面即 T_4^+ 界面(一间房组顶面地震反射界面)深度超过7 250 m。

截至2019年底,Q单元沿断裂带共部署26口油

井,其中主干断裂上有19口井(M1—M19井),分支断裂上有5口井(B1—B5井),次级断裂上有2口井(S1,S2井)。完钻井垂深平均约为7 600 m,部分井超过8 000 m,油井进入 T_4^+ 界面以下深度为45~480 m,平均为196 m。地层压力系数为1.12~1.20,平均地饱压差为52 MPa,井底地层静温为150~165℃,地层温度下地面脱气原油黏度为0.2~3 mPa·s。Q单元以自喷开采为主,底水不活跃,试油期间平均油压为30.7 MPa,2019年底已降至12.5 MPa,平均单井日产油量为74 t/d,气油比约为426 m³/t,综合含水率小于1%,处于无水采油阶段。

2 弹性驱产能典型特征

超深断溶体油藏弹性驱产能典型特征主要为不同断裂级次弹性驱产能差异大(图1),具体表现在:①试油期间日产油量整体偏低,位于次级断裂上的油井几乎无工业油流(图1a)。其原因是:矿场早期对超深断溶体油藏油柱高度、井控储量、油井产能等认识不足,开发初期Q单元井位主要部署在构造高点,油井进入 T_4^+ 界面深度小,平均仅为95 m,即钻完井揭开目的层程度低,且试油期间油嘴设置较小,一般为3~5 mm。②主干断裂是Q单元上产主阵地,平均单井日产油量最高(图1b),累积产油量快速增长,产量贡献最大(图1c);分支断裂次之;次级断裂产能低,未建产。

基于矿场对Q单元产能特征认识,将平均单井日产油量高于50 t/d的油井划分为高产井,低于20 t/d的划分为低产井,介于二者之间的划分为中产井,则由Q单元不同断裂级次高、中、低产井数统计结果(图1d)可以看出:主干断裂上高产井所占比例最大(其值为73.7%),分支断裂上以中、高产井为主,次级断裂上均为低产井。

3 弹性驱产能主控因素

由于超深断溶体油藏非均质性强,弹性驱产能影响因素多,且部分因素之间相互关联,因此,结合前期油藏地质认识,考虑Q单元目前所处开发阶段及开发特征,重点从储量、能量、流度3大方面将超深断溶体油藏弹性驱产能主控因素分别归纳为缝洞储集体规模、地层弹性能量和流体流动能力,并

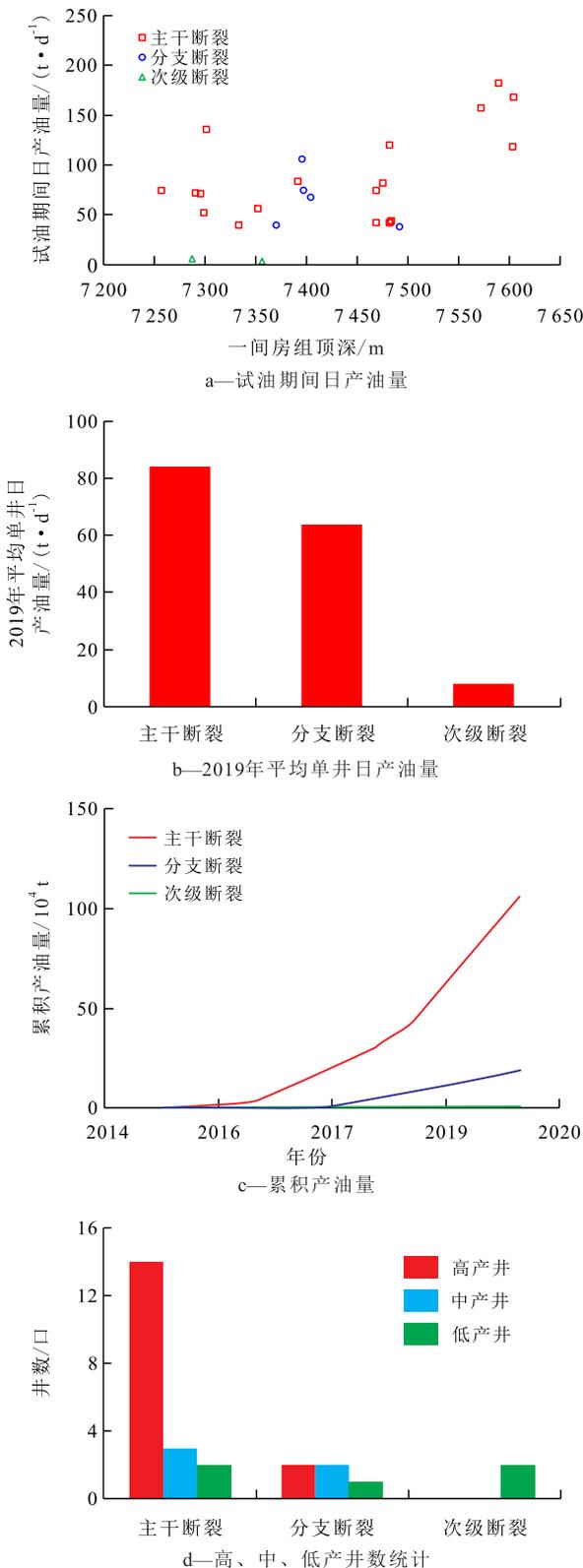


图1 Q单元不同断裂级次弹性驱产能对比

Fig.1 Comparison of elastic flooding productivity at different fault orders in Q Oilfield

简要介绍工程因素。

3.1 缝洞储集体规模

超深断溶体油藏缝、洞不仅是油气流动通道，而且还是油气主要储集空间，缝洞储集体规模直接

反映油气储集空间大小。同一个开发单元，在其他条件(孔隙度、含油饱和度、油水界面、油井进入T₂界面以下深度等)相同的情况下，缝洞储集体规模越大，地质储量和单井控制储量也越大。利用PDA方法^[10]计算Q单元单井控制储量，以此表征缝洞储集体规模，由建立的单井产能与缝洞储集体规模的关系(图2)可以看出：超深断溶体油藏弹性驱单井累积产油量、日产量、阶段累积产油量均与单井控制储量呈强线性关系。

基于物质平衡原理对上述规律进行定量分析与解释。考虑边底水侵入、人工注水影响的水压驱动油藏物质平衡方程可表示为^[11]：

$$N_p B_o + W_p B_w - W_e - W_{inj} B_w = N B_{oi} c_1 (p_i - p) \quad (1)$$

截至2019年底，Q单元所有油井全部依靠地层能量一次采油，未注水；Q单元地层压力下降较快，水体不活跃，水侵作用弱；且油井生产未见水，累积产水量少，统计发现Q单元累积产水量仅占累积产液量的1.3%，因此，Q单元驱动方式属于典型弹性驱或弱弹性水驱，(1)式中 $W_p B_w - W_e - W_{inj} B_w$ 值较小，相对于方程第一项 $N_p B_o$ 可忽略不计，故(1)式可近似写成：

$$N_p = N \frac{B_{oi}}{B_o} c_1 (p_i - p) \quad (2)$$

在一段时间内可近似认为单井控制储量、地层原油体积系数和综合弹性压缩系数不变，根据(2)式可推导得到单井日产量、单井阶段累积产油量分别为：

$$Q_o = \frac{dN_p}{dt} = -N \frac{B_{oi}}{B_o} c_1 \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

$$\Delta N_p = N_p(t=t_2) - N_p(t=t_1) = \int_{t=t_1}^{t=t_2} Q_o dt =$$

$$N \frac{B_{oi}}{B_o} c_1 (p_1 - p_2) \quad (4)$$

理论上，对于一个规模不大、井间连通性好的超深断溶体油藏或开发单元，不同井地层压降可近似认为一致，若进一步忽略综合弹性压缩系数和原油体积系数差异，则弹性驱单井累积产油量、日产量、阶段累积产油量均与单井控制储量成正比，与图2吻合，因此，缝洞储集体规模直接影响超深断溶体油藏弹性驱或开发早期弱弹性水驱的单井产能。要提高单井产能，一方面在早期井位部署时应优选规模大的缝洞储集体，另一方面在开发中后期要尽量提高单井控制储量，目前矿场常采用酸压措施沟通远端缝洞储集体。需要补充说明的是，随着Q单元水侵作用加强、油井产水量逐步增加或开始

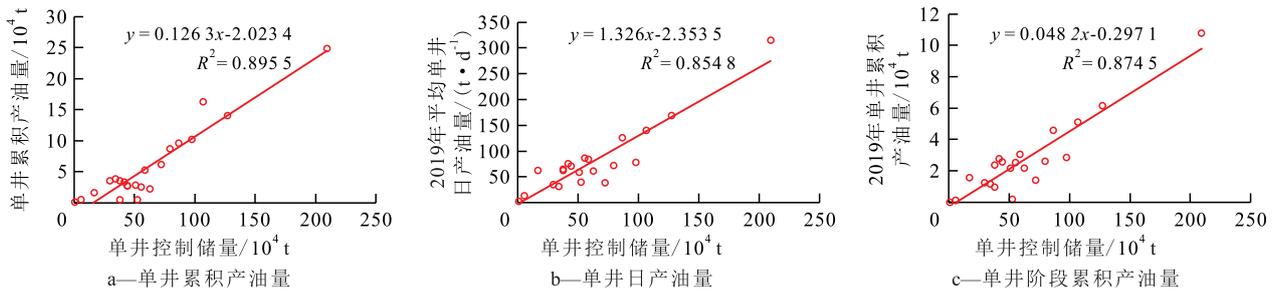


图2 Q单元弹性驱单井产能与缝洞储集体规模的关系

Fig.2 Relationship between single-well elastic flooding productivity and fracture-cavity reservoir scales in Q Oilfield

注水开发,单井产能与单井控制储量会逐渐偏离强线性关系。

结合Q单元开发特征,将单井控制储量高于 30×10^4 t的缝洞储集体规模划分为大规模,低于 10×10^4 t的划分为小规模,介于二者之间的划分为中规模。由Q单元不同断裂级次大、中、小缝洞储集体规模统计结果(图3)可以看出:主干断裂上全部为大规模缝洞储集体,分支断裂上以中、大规模缝洞储集体为主,次级断裂上缝洞储集体规模小,在一定程度上可解释图1中不同断裂级次弹性驱产能差异。

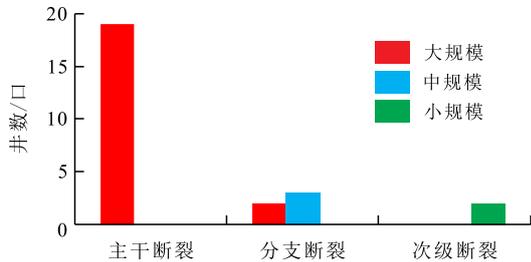


图3 Q单元不同断裂级次缝洞储集体规模对比

Fig.3 Comparison between fracture-cavity reservoir scales at different fault orders in Q Oilfield

3.2 地层弹性能量

目前Q单元主要依靠地层弹性能量实现自喷开采,油井产量完全是以消耗地层弹性能量为代价,地层弹性能量不仅影响自喷期长短,而且影响自喷期产量,其大小通常用弹性产能指数^[12]即单位油藏压降累积产油量表示:

$$\frac{N_p}{p_i - p} = N \frac{B_{oi}}{B_o} c_1 \quad (5)$$

(5)式表明地层弹性能量主要取决于单井控制储量和综合弹性压缩系数。根据实测初始地层压力、目前静压和累积产油量结果,绘制Q单元不同油井弹性产能指数。由图4可以看出:地层弹性能量整体具有主干断裂大于分支断裂、分支断裂大于次级断裂的特征,除缝洞储集体规模差异外,主干断裂构造作用、溶蚀作用强,地层破碎程度高,缝洞孔

隙度相对较大,导致综合弹性压缩系数大,在一定程度上也可解释图1中不同断裂级次弹性驱产能差异。

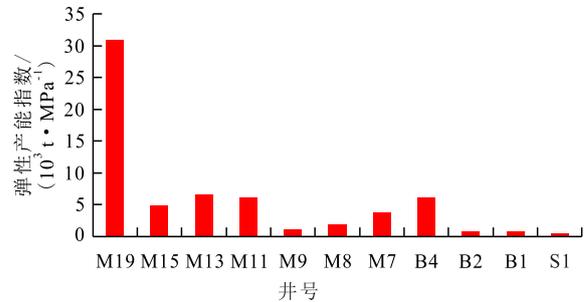


图4 Q单元不同油井弹性产能指数对比

Fig.4 Comparison between elastic productivity indexes of different oil wells in Q Oilfield

根据(2)式可知:当地层压力下降到饱和压力时,弹性驱结束,溶解气驱开始,因此,地饱压差直接影响弹性驱单井累积产油量或弹性驱采收率。假设弹性驱开发到一定阶段地层压力保持程度为 λ ,即 $p = \lambda p_i$,则对(2)式改写并对等号两侧同时取对数,得:

$$\ln N_p = \ln N + \ln [c_1 p_i (1 - \lambda)] + \ln \frac{B_{oi}}{B_o} \quad (6)$$

(6)式右侧第二项、第三项均为无因次量,其中, $c_1 p_i (1 - \lambda)$ 表示当地层压力保持程度为 λ 时,单位视体积缝洞储集体的弹性驱油量。图1a之所以不是一条经过原点的直线,是因为 $\ln [c_1 p_i (1 - \lambda)] + \ln (B_{oi}/B_o) \neq$ 常数,即 $\ln [c_1 p_i (1 - \lambda)] + \ln (B_{oi}/B_o)$ 对于具体单井略有差异。(6)式表明:超深断溶体油藏弹性驱累积产油量不仅与缝洞储集体规模(单井控制储量)密切相关,而且与综合弹性压缩系数、初始地层压力及压力保持程度有关。

(6)式可进一步改写为:

$$\ln N_p = \ln (N p_i) + \ln c_1 + \ln (1 - \lambda) + \ln \frac{B_{oi}}{B_o} \quad (7)$$

令 $Y = \ln N_p$, $X = \ln(Np_i)$, $b = \ln c_i + \ln(1 - \lambda) + \ln(B_{oi}/B_o)$, 则(7)式可表示为:

$$Y = X + b \quad (8)$$

对于一个规模不大、井间连通性好的超深断溶体油藏或开发单元,以Q单元为例,首先,因投产时间长短、缝洞储集体供液能力、油井生产制度等不同,不同井地层压力保持程度可能略有差异,但整体上,在地饱压差大、目前地层压力均高于饱和压力条件下,同一个油藏或开发单元不同井地层压力差异对地层原油体积系数影响并不大,尤其是取对数后不同井 $\ln(B_{oi}/B_o)$ 差别更小。其次,目前Q单元不同井地层压力保持程度约为60%~70%,取对数后不同井 $\ln(1 - \lambda)$ 差别也小。最后,综合弹性压缩系数不易确定,主要取决于岩石、流体压缩系数和孔隙度等,其数量级为 10^{-4} MPa^{-1} ,统一折合成标准单位,则 b 中第一项 $\ln c_i$ 绝对值远大于 $\ln(1 - \lambda) + \ln(B_{oi}/B_o)$ 的绝对值,估算发现 $\ln c_i$ 占 b 值95%左右,因此,若忽略不同井综合弹性压缩系数差异,则(8)式中 b 对于不同井近似相等,即使认为不同井综合弹性压缩系数有差异,按最大相差一个数量级计算,取对数后 $\ln c_i$ 差别仅为 $\ln 10 = 2.30$,占其绝对值的10%~11.05%。综上所述,理论上,同一个油藏或开发单元,以 Y 为纵坐标,以 X 为横坐标,二者是一条斜率等于1的直线,直线截距主要表示地层弹性能量中综合弹性压缩系数对累积产油量的影响。由Q单元实际结果(图5)可以看出:曲线斜率为1.095 1,且相关系数较高,考虑上述近似处理带来误差,实际结果与理论分析基本吻合,论证超深断溶体油藏弹性驱单井累积产油量、单井控制储量与初始地层压力乘积在对数坐标上是一条斜率近似为1的直线。

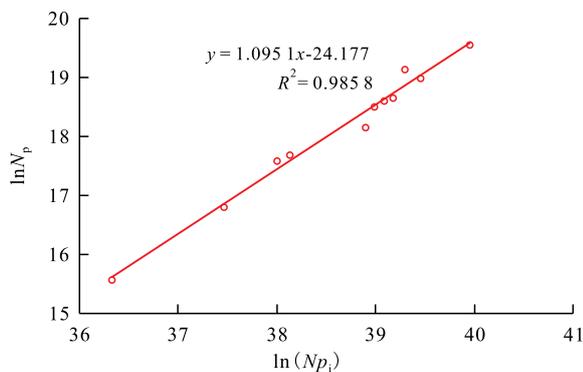


图5 Q单元 N_p 与 Np_i 的关系

Fig.5 Relationship between N_p and Np_i in Q Oilfield

为进一步分析地层弹性能量中综合弹性压缩

系数对累积产油量的影响,将(7)式改写为:

$$\ln N_p = \ln N + \ln p_i + b \quad (9)$$

对(9)式做归一化处理,得:

$$1 = \frac{\ln N}{\ln N_p} + \frac{\ln p_i}{\ln N_p} + \frac{b}{\ln N_p} \quad (10)$$

对(10)式中每一项数值大小做进一步分析,Q单元 $\ln N_p$ 为15.58~19.55,平均为18.11; $\ln N$ 为18.11~21.69,平均为20.35; $\ln p_i$ 为18.22~18.30,平均为18.27,即(10)式右侧第一项平均约为1.12,右侧第二项平均约为1.01,右侧第三项平均约为-1.13,因此,在超深断溶体油藏弹性驱阶段,综合弹性压缩系数、缝洞储集体规模对累积产油量影响大于初始地层压力对累积产油量的影响。要提高超深断溶体油藏弹性驱单井累积产油量,除提高单井控制储量外,在早期井位部署时应利用地球物理手段优选主干断裂地层破碎程度高的缝洞储集体,确保综合弹性压缩系数和地层弹性能量更大,同时,应优化油井进入 T_1^+ 界面以下深度,提高初始地层压力,确保弹性驱压降空间更大。

3.3 流体流动能力

缝洞储集体规模和地层弹性能量分别从储量和能量角度进行分析,其中,储量是产能前提,能量决定油藏、开发单元或油井开发方式,它是产能能否通过弹性驱获取的重要依据,也是目前Q单元能否持续自喷求产关键,其大小直接影响弹性驱采收率。在储量、能量都满足的前提下,若地下流体不流动也不能实现油井建产、上产和稳产,典型表现就是特/超稠油、致密油弹性驱无产能^[13-14]。因此,重点分析流体流动能力对弹性驱产能的影响,流体流动能力一方面与储层渗透率有关,另一方面与流体黏度相关,故综合应用渗透率与流体黏度之比即流度表征流体流动能力。

前期通过分析Q单元系统试井资料,普遍发现在排除井间干扰因素下,早期系统试井所获得的油井IPR曲线均为一条直线,因此,可用单位生产压差日产油量,即系统试井测试得到的采油指数间接表征流度大小,并分别绘制油井采油指数与单井日产油量的关系(图6)、不同断裂级次采油指数对比(图7),可以看出:流体流动能力越强,平均单井日产油量越高;主干断裂流体流动能力整体高于分支断裂,次级断裂流体流动能力最弱,同样可解释图1中不同断裂级次弹性驱产能差异。

3.4 工程因素

影响超深断溶体油藏弹性驱产能还有其它因

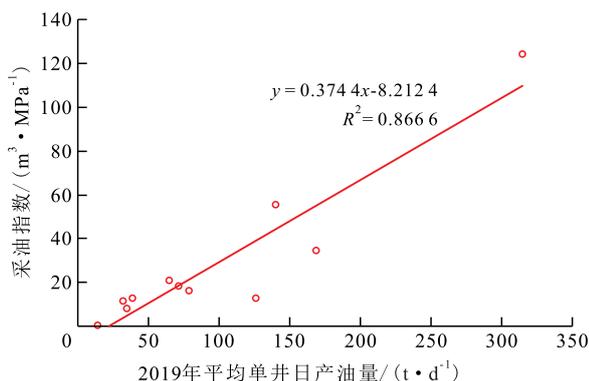


图6 Q单元油井采油指数与单井日产量关系

Fig.6 Relationship between oil productivity indexes and single-well daily oil production in Q Oilfield

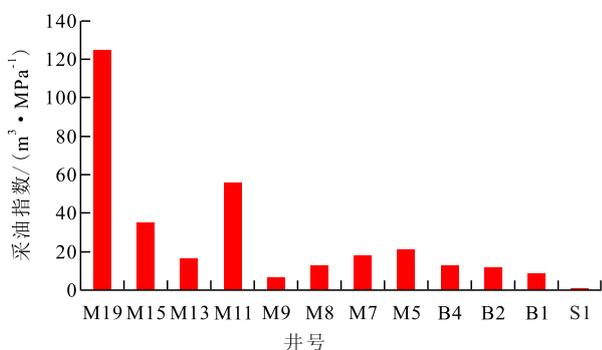


图7 Q单元不同断裂级次油井采油指数对比

Fig.7 Comparison between oil productivity indexes at different fault orders in Q Oilfield

素,重点讨论工程因素,因为对于Q单元这种超深断溶体油藏,油藏地质条件太复杂,在钻完井、油井正常生产、储层改造、修井作业等过程中易引起工程问题,主要包括:钻完井过程中井周污染,泥浆堵塞地层;地层出砂;井下落鱼;井壁不稳定等。其中,主干断裂上低产井M1是由于固井质量差、套管漏失导致长期修井影响产能,低产井M9是由于井周污染、岩屑堵塞地层和油管影响产能;分支断裂上低产井B5是由于井下落鱼、油管堵塞导致产能低。

4 结论

超深断溶体油藏不同断裂级次弹性驱产能差异大,主干断裂是上产主阵地,产量贡献、平均单井日产量、高产井占比均最大,分支断裂次之,次级断裂产能低、未建产。超深断溶体油藏弹性驱产能主控因素包括缝洞储集体规模、地层弹性能量和流体流动能力,工程因素也会影响油井产能;缝洞储集体规模、地层弹性能量、流体流动能力整体均呈主干断裂大于分支断裂、分支断裂大于次级断裂特征。超深断溶体油藏弹性驱单井累积产油量、日产

油量、阶段累积产油量均与单井控制储量呈强线性关系;超深断溶体油藏弹性驱单井累积产油量、单井控制储量与初始地层压力乘积在对数坐标上是一条斜率近似为1的直线;综合弹性压缩系数、缝洞储集体规模对累积产油量影响大于初始地层压力对累积产油量的影响;流体流动能力越强,平均单井日产量越高。要提高目前Q单元单井产能,早期井位部署时应优选规模大、地层破碎程度高的缝洞储集体,开发中后期要尽量提高单井控制储量,同时,应优化油井进入 T_7^4 界面以下深度,提高初始地层压力,确保弹性驱压降空间更大。

符号解释

- B_0 ——当压力为 p 时地层原油体积系数, m^3/m^3 ;
- B_{oi} ——初始地层压力下地层原油体积系数, m^3/m^3 ;
- B_w ——当压力为 p 时地层水体积系数, m^3/m^3 ;
- c_i ——综合弹性压缩系数, MPa^{-1} ;
- N ——区块地质储量或单井控制储量, m^3 ;
- N_p ——累积产油量, m^3 ;
- ΔN_p ——单井阶段累积产油量, m^3 ;
- p ——目前地层压力, MPa ;
- p_i ——初始地层压力, MPa ;
- p_{t_1} —— t_1 时刻地层压力, MPa ;
- p_{t_2} —— t_2 时刻地层压力, MPa ;
- Q_o ——单井日产量, m^3/d ;
- t ——时间, d ;
- t_1, t_2 ——某一时刻, d ;
- W_e ——水侵量, m^3 ;
- W_{inj} ——累积注水量, m^3 ;
- W_p ——累积产水量, m^3 ;
- λ ——地层压力保持程度。

参考文献

- [1] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.
JIAO Fangzheng.Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J].Oil & Gas Geology, 2018,39(2):207-216.
- [2] 丁志文,汪如军,陈方方,等.断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律——以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J].石油勘探与开发,2020,47(2):286-296.
DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, et al.Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020,47(2):286-296.
- [3] 何治亮,金晓辉,沃玉进,等.中国海相超深层碳酸盐岩油气藏特点及勘探领域[J].中国石油勘探,2016,20(1):3-14.

- HE Zhiliang, JIN Xiaohui, WO Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 20(1): 3-14.
- [4] 顾浩, 尚根华, 李慧莉, 等. 基于井温的超深断溶体油藏油井动用深度计算 [J]. *特种油气藏*, 2021, 28(2): 57-62.
- GU Hao, SHANG Genhua, LI Huili, et al. Calculation of drainage depth for oil well based on well temperature in ultra-deep fault-karst reservoirs [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(2): 57-62.
- [5] 唐海, 何娟, 荣元帅, 等. 塔河断溶体油藏典型断溶体注水驱替规律及剩余油分布特征 [J]. *油气地质与采收率*, 2018, 25(3): 95-100.
- TANG Hai, HE Juan, RONG Yuanshuai, et al. Study on water drive law and characteristics of remaining oil distribution of typical fault-karst in fault-karst reservoirs Tahe Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018, 25(3): 95-100.
- [6] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系 [J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 878-888.
- DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 878-888.
- [7] 李成刚, 李英强. 碳酸盐岩断溶体油藏模型识别图版及其应用 [J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(4): 87-93.
- LI Chenggang, LI Yingqiang. Identifying chart boards and their applications of the models for the fault-karst carbonate oil reservoir [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(4): 87-93.
- [8] 刘培亮, 李成刚, 蒋林. 断溶体油藏仿底水与仿压裂注水方法和应用效果研究 [J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 54-59, 70.
- LIU Peiliang, LI Chenggang, JIANG Lin. Research and application of water injection by imitating bottom water and fracturing in fault-karst carbonate reservoirs [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 54-59, 70.
- [9] 瞿长, 赵锐, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺北5断裂带储集体地震反射特征与产能特征分析 [J]. *特种油气藏*, 2020, 27(1): 68-74.
- QU Chang, ZHAO Rui, LI Huili, et al. Seismic reflection and productivity of reservoirs in the Fault-zone5 of Shunbei, Tarim Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(1): 68-74.
- [10] 吕心瑞, 刘中春, 朱桂良. 基于PDA方法的缝洞型油藏井控储量评价 [J]. *断块油气田*, 2017, 24(2): 233-237.
- LÜ Xinrui, LIU Zhongchun, ZHU Guilang. Well-controlled reserves evaluation of fracture vuggy reservoirs based on PDA method [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2017, 24(2): 233-237.
- [11] 刘德华, 刘志森. 油藏工程基础 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- LIU Dehua, LIU Zhisen. *Foundation of reservoir engineering* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [12] 李传亮. 油藏工程原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- LI Chuanliang. *Principle of reservoir engineering* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [13] 束青林, 王顺华, 杨元亮, 等. 春风油田浅薄层超稠油油藏高速高效开发关键技术 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(3): 9-19.
- SHU Qinglin, WANG Shunhua, YANG Yuanliang, et al. Key technology of high-speed and high-efficiency development of thin-shallow super-heavy oil reservoir in Chunfeng Oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(3): 9-19.
- [14] 徐加祥, 丁云宏, 杨立峰, 等. 致密油藏分段多簇压裂水平井复杂缝网表征及产能分析 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(5): 132-138.
- XU Jiexiang, DING Yunhong, YANG Lifeng, et al. Complex fracture network characterization and productivity analysis of multi-stage fractured horizontal well in tight oil reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(5): 132-138.

编辑 刘北羿