

· 评价解释与应用 ·

文章编号: 1004-4388(2023)06-0065-07

# 串珠状缝洞型储层油藏产能指示曲线解析

徐燕东

中石化西北油田分公司石油工程技术研究院 新疆乌鲁木齐 830011

通讯作者: Email: tonnyxu2001@126.com

项目支持: 中石化重大科技攻关“特深层油气钻完井关键技术与装备”课题 6“塔里木盆地特深层钻完井工程技术示范”(P21081-6)

引用: 徐燕东. 串珠状缝洞型储层油藏产能指示曲线解析[J]. 油气井测试, 2023, 32(6): 65-71.

Cite: XU Yandong. Analysis of productivity indicator curves for bead-shaped fractured-vuggy oil reservoirs[J]. Well Testing, 2023, 32(6): 65-71.

**摘要** 塔里木盆地缝洞型碳酸盐岩油藏储层结构复杂, 即使产能测试期间井口压力高于饱和压力, 产能指示曲线形态也存在多样性。从缝洞型储层复杂结构特征出发, 假设洞穴型储层是管流、裂缝型储层是渗流, 推导出串联型缝洞型储层产能方程表达式, 进一步建立了产能方程与井周围缝洞储层分布的关系。经塔里木某缝洞型储层 7 口井的产能指示曲线实际应用, 可以定性解析出井周储层结构特征, 并与压恢试井反应的储层结构特征基本吻合; 同时也可定量计算出近井洞穴的流动系数、裂缝系统流动系数的湍流系数。该方法是利用产能试井方法定性分析缝洞型储层结构特征和流动特征方法的有益探索。

**关键词** 塔里木盆地; 缝洞型油藏; 产能试井; 指示曲线; 湍流系数; 定性分析; 储层结构; 流动特征

中图分类号: TE328 文献标识码: A DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.06.011

## Analysis of productivity indicator curves for bead-shaped fractured-vuggy oil reservoirs

XU Yandong

Petroleum Engineering Technology Research Institute of Sinopec Northwest Oilfield Branch, Urumqi, Xinjiang 830011, China

**Abstract:** The structure of fractured-vuggy carbonate reservoirs in Tarim Basin is complex, and the shape of production capacity curve during the test period is diverse even if the wellhead pressure is higher than the saturation pressure. Starting from the complex structural characteristics of fractured-vuggy reservoirs, assuming that cavernous reservoirs are flowing through pipes and fractured reservoirs are seepage, a serial type production capacity equation expression for fractured-vuggy reservoirs was derived, and furthermore, the relationship between production capacity equation and distribution of fractured-vuggy reservoirs around the well was established. Through the application of production capacity indicator curves in seven wells of a fractured-vuggy reservoir in Tarim Basin, the structural features around the well can be qualitatively analyzed, which generally coincides with those reflected by pressure recovery well test; meanwhile, the flow coefficient of near-well caverns and turbulence coefficient of fracture system flow coefficient can also be quantitatively calculated. The results show that this method is a useful exploration for qualitative analysis of structural features and flow characteristics of fractured-vuggy reservoirs using production capacity test methods.

**Keywords:** Tarim basin; fracture-cavity oil reservoirs; productivity testing; index curve; turbulence coefficient; qualitative analysis; reservoir structure; flow characteristic

塔里木奥陶系的缝洞型油藏是经过多期构造运动和古岩溶共同作用形成的岩溶缝洞型碳酸盐岩油藏。油藏储集体以构造裂缝与岩溶作用形成的孔、洞、缝为主, 其中大型洞穴是最主要的储集空间。裂缝既是主要的储集空间, 也是主要的连通通道。基质基本不具有储渗意义, 储集空间形态多样、大小悬殊、分布不均, 具有很强的非均质性<sup>[1-3]</sup>。裂缝开度较大, 渗透率较高, 但相对于溶洞来说储集能力较小, 可归类为低储高渗单元, 是流体流动的主要通道; 溶洞体积巨大, 可归类为高储高渗单

元, 是流体的主要储存场所<sup>[4]</sup>。

对于此类复杂储集体, 国内外许多学者从不同的角度、不同的简化方式和假设条件, 开展了相关产能方程评价。高树生<sup>[5]</sup>通过应力敏感物理模拟实验, 得到了不同储层特征岩样对应的流态特征与应力敏感特征, 获取了碳酸盐岩储层应力敏感模型和高速非达西渗流系数模型, 最终建立起了考虑应力敏感与高速非达西系数的二项式。杨瑀<sup>[6]</sup>基于圆形地层中溶洞和裂缝符合达西定律, 推导出 6 种不同“基质、裂缝、溶洞”组合储层的产能方程。王

禹川<sup>[7]</sup>通过对大量缝洞型储层油井产能资料和产量数据统计,线性回归,得出产量与井口油压的经验关系式。刘曰武<sup>[8]</sup>建立了孔隙、裂缝、溶洞型三重介质的试井理论图版,但仍是基于渗流理论。林加恩<sup>[9]</sup>建立了缝洞型储层管流和渗流的流动模型,理论计算了一维和二维流动概念模型的压力分布,但未与现场实际资料相结合。王子胜<sup>[10]</sup>缝洞型油藏流动的探索,但基岩相当于“源”项的假设不适合实际油藏。张冬丽<sup>[11]</sup>研究缝洞型储层三重介质的数值试井解,在流动机理方面并没有跳出刘曰武方法的局限。蔡明金<sup>[12]</sup>开展缝洞型出大尺度多洞缝型油藏试井分析方法,洞为等势体的假设,忽略了洞的流动和井筒的储集效应。康志江<sup>[13]</sup>研究了缝洞型油藏洞穴内流体流动特征,但仍是基于洞是等

势体的假设。本文从分析缝洞型储层产能指示曲线出发,根据缝洞型储层多年开发认识,根据直线型和曲线型产能指示曲线特征,结合缝洞型储层地质资料,提出从储层特征的角度分析产能指示曲线,并推导出串珠状缝洞型储层油藏产能方程,并进行了实例分析应证。

## 1 串珠状缝洞型储层和产能指示曲线特征

缝洞型储层储集体结构多样、流动特征复杂,实际产能测试的指示曲线出现多种多样的曲线特征:有曲线型、直线型、不过原点直线型(压差截距为负)、不过原点直线型(压差截距为正)、混合型(偏向压差轴)、混合型(偏向产量轴)等(见图1)。

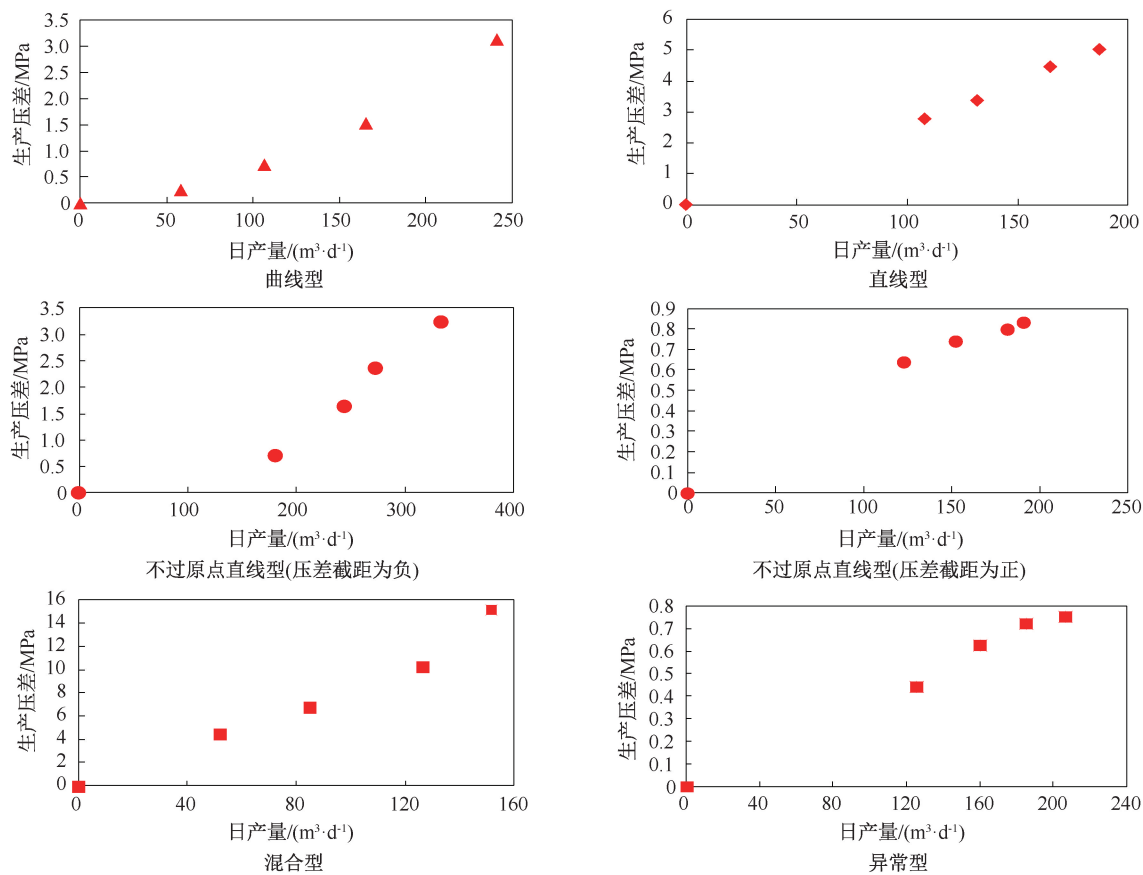


图1 缝洞型储层产能指示曲线  
Fig.1 Production capacity index curve of fracture-cavity reservoirs

常规砂岩理论对这样的产能指示曲线特征解释如下:

- (1)直线型:单相达西渗流,一般在较小压差条件下形成。
- (2)曲线型:单相非达西流或油气两相渗流,一般在较大生产压差或流压小于饱和压力时形成。

- (3)混合型:直线部分为单相达西渗流;曲线部分可能原因:①随着生产压差的增大,油藏中出现了单相非达西流,增加了额外的惯性阻力;②随着生产压差增大,流压低于饱和压力,井壁附近地层出现了油气两相渗流,油相渗透率降低,黏滞阻力增大。

(4)异常型:相应工作制度下的生产未达稳定,测得的数据不反映测试所要求的条件;新井井壁污染,随着生产压差增大,污染将逐渐排除。

以上理论很难完全解释清楚缝洞型出产能指示曲线:

(1)出现曲线型特征的井,生产压差有大有小,并且井口压力大于饱和压力,储层不可能出现油气两相流。

(2)出现混合型特征的井,井口压力大于饱和压力,储层同样不可能出现油气两相流;随着产量增加,储层存在非达西流的可能,但是可能是其它原因造成的非达西流。

(3)对于不过原点的直线型曲线特征,原有理论是无法解释。当然,不过原点直线型(压差截距为负)可能就是混合型的一种,只是测试工作制度太大,未测试到初期的直线段。即使这样,还是难以用原有理论进行解释。同样的原因,不过原点直线型(压差截距为正)可能就是异常型的一种。

碳酸盐岩地震剖面经常出现串珠状特征,此类剖面特征是塔里木盆地碳酸盐岩主要的布井依据。此类储层非均值性极强,与常规砂岩相比,有如下一个流动特征:砂岩油气藏,一般流动角是  $360^{\circ}$ ,即油气是从四周汇流至井筒;而缝洞型储层的流动角很少有  $360^{\circ}$ 的,即油气是从某个特定方向流向井筒方向(见图 2),这样的流动特征造成同样的产量下,油气在缝洞型储层的裂缝部分流动的速度比砂岩的流动速度快得多,进而造成局部流动可能存在湍流。同时,此类油藏的试井双对数曲线多数具有两个“凹子”,具有这种“凹子”的特征曲线,一般都认为是两个规模储集体响应,图 3 和图 4 是同一口井的地震剖面 and 双对数曲线。地震剖面显示该井直接打在一个“串珠上”,距离第一个串珠不远的深部还存在另外一个串珠,而双对数曲线也反应出两个“储集体”。

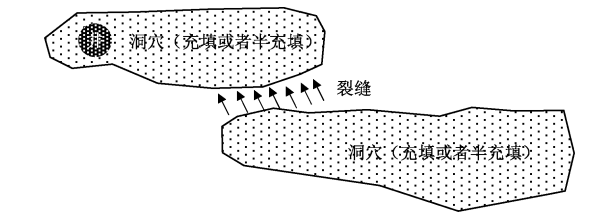


图 2 缝洞型储层油气流动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of oil and gas flow in a fractured-cavity reservoir

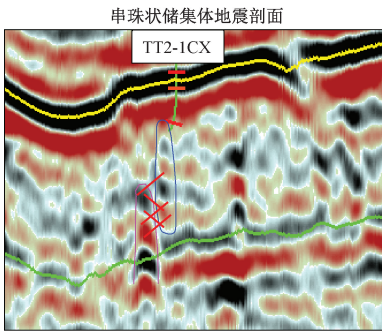


图 3 串珠状缝洞型储层地震剖面图

Fig. 3 Seismic profile of beaded fracture-cavity reservoir

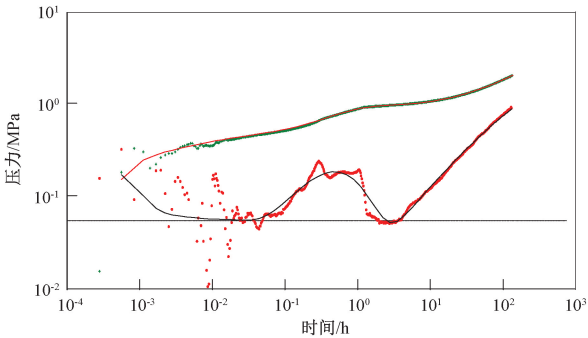


图 4 TT2-1CX 双对数曲线

Fig. 4 TT2-1CX well testing double logarithmic curve

## 2 串珠状缝洞型储层油藏产能方程推导

缝洞型碳酸盐岩储层内部缝洞连通形式各异,溶洞与裂缝之间串并联关系复杂多变。其中,“串珠状”缝洞型储层是最为常见的连通形式之一。本次研究中主要针对串珠状缝洞型储层进行数学模型的建立。串珠存在平面上的串珠,也存在垂向上的串珠,为推导方便,这里只考虑平面上的串珠。假设一口井直接钻遇(或者通过人工缝或者天然大裂缝沟通)储集体 1,储集体 1 通过裂缝系统沟通储集体 2(见图 5)。

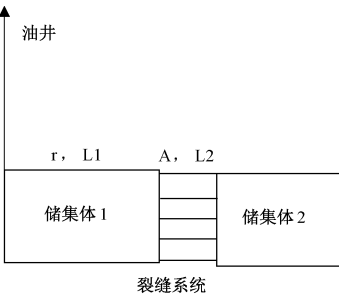


图 5 串珠状缝洞型储层油藏示意图

Fig. 5 Schematic diagram of beaded fracture-cavity reservoir

为简化研究,做出如下假设:



(1) 储集体 1、储集体 2 和裂缝系统都是流动通道,也都是储油空间,但是基质不是储油空间,也不具有流动能力。

(2) 生产时储集体 2 的原油全部流进裂缝系统,再由裂缝系统流入储集体 1,最后流入油井。

(3) 流体为单相微可压缩流体,流动为等温过程,储集体 1 和储集体 2 内流动满足流体力学原理,裂缝系统内流动满足达西定律。

(4) 溶洞为圆管。

相对常规砂岩储层,连通两个串珠状缝洞型储层的裂缝面积非常有限,裂缝中极易出现高速湍流。对于储集体 1,在层流状态下,“管子”中的流动满足 Poiseuille 定律<sup>[14]</sup>,其流动方程为

$$q = \frac{\pi r^4 \Delta p_1}{8\mu B_o L_1} \quad (1)$$

式中: $r$  为储集体 1 的半径,m; $L_1$  为储集体 1 的长度,m; $\Delta p_1$  为流体在 1 中的流动压差,Pa; $q$  为流过储集体 1 的流量, $\text{m}^3/\text{s}$ ,也是油井的产量; $\mu$  为流体的黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $B_o$  为流体的体积系数, $\text{m}^3/\text{m}^3$ 。

考虑实际储集体形状不可能是圆管,形态各异、内部充填不同、并且迂回曲折等原因造成的附加压降  $\Delta p_{\text{附}}$ ,即

$$\Delta p_1 - \Delta p_{\text{附}} = \frac{8\mu B_o L_1 q}{\pi r^4} \quad (2)$$

引入溶洞表皮系数  $S_v$  来表征  $\Delta p_{\text{附}}$

$$S_v = \frac{8KL_1}{qB_o\mu} \Delta p_{\text{附}} \quad (3)$$

对于管流<sup>[15]</sup>,其渗透率为

$$K = \frac{r^2}{8} \quad (4)$$

代入式(3)可得

$$S_v = \frac{r^2 L_1}{8qB_o\mu} \Delta p_{\text{附}} \quad (5)$$

有

$$\Delta p_1 = \frac{8B_o\mu(L_1^2 + \pi r^2 S_v)}{\pi r^4 L_1} \cdot q \quad (6)$$

对于缝洞型储层中的特定裂缝,当产量达到某一个值时,在裂缝中油气满足文献[16]的流动

$$\frac{dp}{dl} = \frac{\mu}{K} v + \beta p v^2 \quad (7)$$

式中: $K$  为裂缝渗透率, $\text{m}^2$ ; $\mu$  为地层原油黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ; $p$  为地层原油密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $\beta$  为湍流系数, $\text{m}^{-1}$ 。

同时

$$v = \frac{q_2 B_o}{A_f} \quad (8)$$

式中: $A_f$  为裂缝实际过流面积, $\text{m}^2$ ; $q_2$  为流过裂缝的流量, $\text{m}^3/\text{s}$ 。

式(8)代入式(7)得

$$\frac{dp}{dl} = \frac{K}{\mu} \frac{q_2 B_o}{A_f} + \beta p \left( \frac{q_2 B_o}{A_f} \right)^2 \quad (9)$$

对(9)式积分,并代入边界条件可得

$$\Delta p_2 = \frac{KB_o L_2}{\mu A_f} q_2 + \frac{\beta p B_o^2 L_2}{A_f^2} q_2^2 \quad (10)$$

式中: $L_2$  为两套储集体之间裂缝的长度,m; $\Delta p_2$  为流体流过裂缝的流动压差,MPa。

从远井筒流入井筒的生产压差  $\Delta p$  为

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (11)$$

有

$$\Delta p = \frac{8B_o\mu(L_1^2 + \pi r^2 S_v)}{\pi r^4 L_1} \cdot q + \frac{KB_o L_2}{\mu A_f} q_2 + \frac{\beta p B_o^2 L_2}{A_f^2} q_2^2 \quad (12)$$

若:储集体 1 本身产量为  $q_1$ ,外部流入储集体 1 的产量是  $q_2$ ,设  $n = q_1/q_2$ ,则

$$q_2 = \frac{q}{1+n} \quad (13)$$

代入(12)式,整理得

$$\Delta p = \frac{8B_o\mu(L_1^2 + \pi r^2 S_v)}{\pi r^4 L_1} q + \frac{KB_o L_2}{\mu A_f(1+n)} q + \frac{\beta p B_o^2 L_2}{A_f^2(1+n)^2} q^2 \quad (14)$$

$$\text{设 } a_1 = \frac{8B_o\mu(L_1^2 + \pi r^2 S_v)}{\pi r^4 L_1}, a_2 = \frac{KB_o L_2}{\mu A_f}, b = \frac{\beta p B_o^2 L_2}{A_f^2}$$

式中: $a_1$  为储集体 1 流动系数,  $(\text{d}\cdot\text{MPa})/\text{m}^3$ ; $a_2$  为裂缝系统流动系数,  $(\text{d}\cdot\text{MPa})/\text{m}^3$ ; $b$  为裂缝系统湍流系数,  $(\text{d}^2\cdot\text{MPa})/\text{m}^6$ 。

则

$$\Delta p = a_1 q + \frac{a_2}{(1+n)} q + \frac{b}{(1+n)^2} q^2 \quad (15)$$

上式也可变形为

$$\Delta p = Aq + Bq^2 \quad (16)$$

$$\text{其中 } A = a_1 + \frac{a_2}{1+n}, B = \frac{b}{(1+n)^2}$$

(15)式和(16)式就是串珠状缝洞型储层油藏产能公式。最终形式上与常规砂岩的二项式产能方程一样,但是每个系数表征的物理意义相去甚远。



讨论:

(1)对于串珠状缝洞型储层油藏产能指示曲线,当初始工作制度小且极差较小,并且储集体 1 的产量比外部储集体产量大时,指示曲线理论上存初期直线段,其斜率就是  $a_1$ 。但是,现场实际产能测试时,基本没有从很小的工作制度开始测试,并且工作制度极差还很小,因此现场很难求取到  $a_1$  值。

(2)当裂缝系统和外部储集体开始流动时,产能指示曲线为二项式方程,通过二项式方程的拟合,可以求出  $a_2$  和  $b$ 。

(3)当  $n > 1$  时,  $1/(1+n) \approx 0$ , 则:  $\Delta p = a_1 q$ , 指示曲线表现为直线型,主要反应出储集体 1 的产出特性,即储集体 1 是主要的储层空间或者就不存在储集体 2。

(4)当  $0 < n < 1$  时,  $1/(1+n) \approx 1$ , 则:  $\Delta p = (a_1 + a_2) q + b q^2$ , 指示曲线表现为曲线型,且主要体现出远井筒裂缝流动特征影响,同时也可判断储集体 2 是主要储集体空间。

(5)产能测试的工作制度一般是从小到大进行,在不同工作制度下  $n$  值可能会是一个变化量:①是当产量较小时,主要产出来至近井储集体,可能存在  $n \gg 1$ ;②当产量较大时,外围产量贡献逐渐增加,且可能存在  $0 < n < 1$ 。这样就出现混合型曲线特征。

(6)不过原点直线型的两种曲线产能测试时有一个共同的特征,就是第一个工作制度设计太大,造成了曲线的前期特征缺失,目前认为:①不过原点直线型(压差截距为负)可能是混合型的一种;②不过原点直线型(压差截距为正)可能是异常型的一种,而且异常原因主要是生产期间油井自解堵。

### 3 实例分析

塔里木某油田某区块属于未饱和油藏,原始地层压力 86~88 MPa,饱和压力 32~36 MPa。在开发前期,对第一批部署的 7 口井都进行了系统测试(见表 1)。

表 1 塔里木某油田某区块初期 7 口井产能测试表  
Table 1 Production capacity test of 7 wells in a block of a Tarim oilfield in the early stage

TX001		TX002		TX003		TX004		TX005		TX006		TX007	
产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa	产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa	产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa	产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa	产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa	产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa	产量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	压差/ MPa
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58.4	0.25	52.38	1.73	64.29	0.41	39.98	4.32	51.8	4.45	108	2.79	55.5	1.78
107	0.73	69.38	2.51	95	0.69	61.25	6.66	84.8	6.8	132	3.37	86.8	4.59
165.45	1.52	85.5	3.3	136.92	0.96	83.63	9.39	126.3	10.26	165.1	4.47	108.11	5.88
241.23	3.13	89.25	4.45	160	1.05	88.75	12.96	151.6	15.18	187.3	5.04	116.75	8.93

这 7 口井的产能指示曲线,有两口井是直线型(见图 6),压恢双对数曲线显示近井只存在一套储集体(见图 7),用文献[17]的方法,识别近井存在一个洞穴型储层,解释其动态储量  $114.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,也即上面所述讨论 3 的情况,  $n \gg 1$ 。定量计算近井洞穴流动系数为  $0.0266 (\text{d} \cdot \text{MPa})/\text{m}^3$ 。

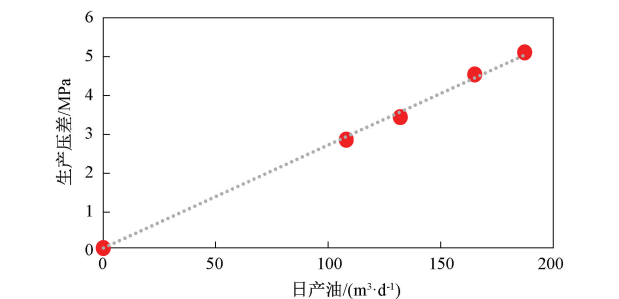


图 6 TX006 井产能指示曲线  
Fig. 6 TX006 productivity index curves

两口井是曲线型(见图 8),压恢双对数曲线显示近井存在两套储集体(见图 9),用文献[17]的方法,

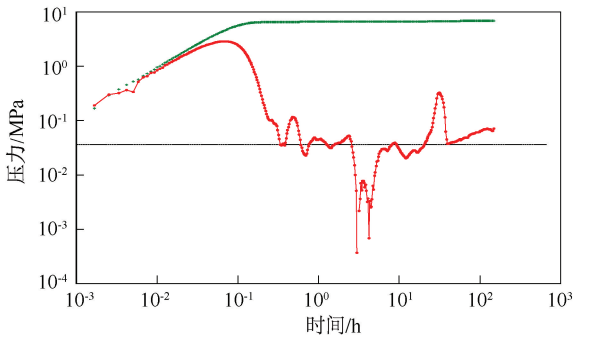


图 7 TX006 双对数曲线  
Fig. 7 TX006 double logarithmic curve

识别该井存在两个洞穴型储层,近井洞穴动态储量  $10.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,远井洞穴动态储量  $171.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,在产能测试期间出现了上面所述讨论 4 的情况,  $0 < n < 1$ 。定量计算近井洞穴和裂缝的流动系数为  $0.015 (\text{d} \cdot \text{MPa})/\text{m}^3$ ,裂缝系统湍流系数  $0.00045 (\text{d}^2 \cdot \text{MPa})/\text{m}^6$ 。

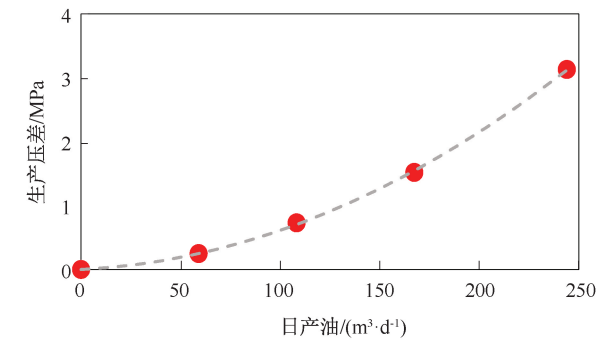


图 8 TX001 井产能指示曲线

Fig. 8 TX001 productivity index curves

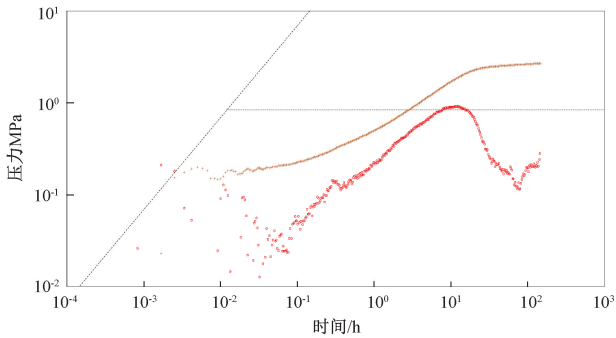


图 9 TX001 双对数曲线

Fig. 9 TX001 double logarithmic curve

另外 3 口井是混合型 (TX002、TX004 和 TX005), 干扰试井已经证实具有混合型特征的 3 口井相互连通(见图 10)。

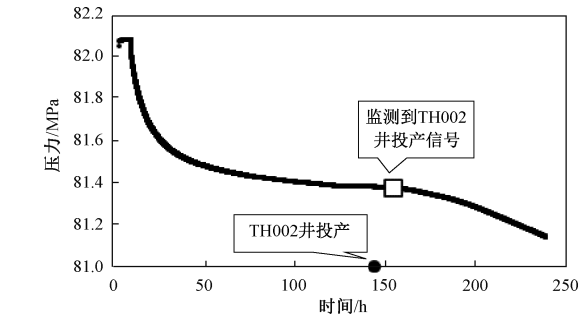


图 10 TX002 干扰信号

Fig. 10 TX002 well Interference signal

其中 TX005 井最先投产, 该井和 TX002 井的双对数(见图 11、图 12) 都显示都只存在近井一套洞穴型储集体, 外围物性变差, 可能存在裂缝型储层; 用文献[17]的方法, 解释 TX005 井近井洞穴动态储量  $60.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ , TX002 井近井洞穴动态储量  $111.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。TX005 井压降测试监测到了邻井 TX002 井投产的干扰信号, 两口井井口直线距离 585 m, 计算压力波传播速度达到了 66.3 m/h, 表明两口井之间连通性非常好。因此, 在 TX005 井产能测试期间, 其实是存在两套规模相当的洞穴型储层, 只是在工作制度小时, 主要是近井洞穴产出, 工作制度大时

远井储层产出逐渐增加, 裂缝对流动特征的影响随产量增加而增加, 即产能测试期间出现了上述讨论 5 的情况。遗憾的是, 工作制度没有继续增加, 以探测远井产量持续增加后的生产特征。定量计算近井洞穴和裂缝的流动系数为  $0.0815 (\text{d} \cdot \text{MPa})/\text{m}^3$ , 裂缝系统湍流系数  $0.0003 (\text{d}^2 \cdot \text{MPa})/\text{m}^6$ 。

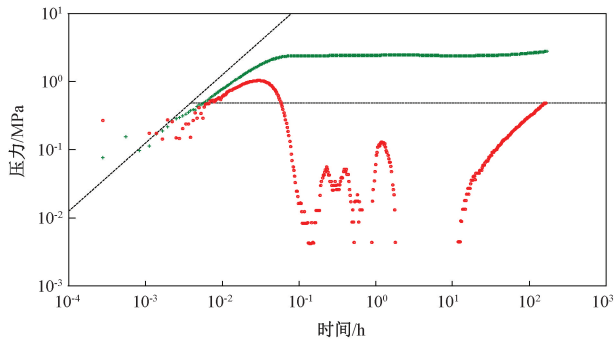


图 11 TX005 双对数曲线

Fig. 11 TX005 double logarithmic curve

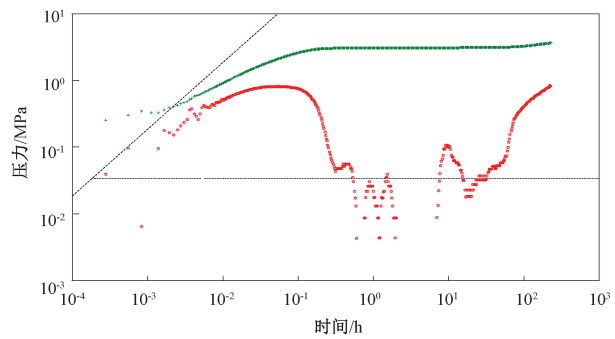


图 12 TX002 井产能指示曲线

Fig. 12 TX002 productivity index curves

## 4 结论

(1) 缝洞型储层油藏虽然存在洞穴型储层, 但是裂缝的流动能力是制约其产能曲线特征的主要因素。

(2) 推导了新的缝洞型储层油藏产能方程, 通过产能方程建立了异常产能曲线特征与井周缝洞储层特征的关系: ①直线型产能指示曲线, 对应近井存在规模洞穴型储层; ②曲线型产能指示曲线, 储层特征为“小洞-缝-大洞型”或者是“缝-洞型”; ③混合型产能指示曲线, 储层特征为“大洞-缝-大洞”。

(3) 通过现场 7 口井应用, 验证了新的产能方程的适用性, 证实了该方法适用于井口高于泡点压力的缝洞型储层油藏; 是否可应用于井口压力低于泡点压力, 但地层压力高于泡点压力的缝洞型油藏, 还需实例资料进一步验证。



**致谢:**感谢中石化西北油田分公司石油工程技术研究院同意本文公开发表。

## 参考文献

- [1] 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 oilfield, Xinjiang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28 (5): 17-22.
- [2] 林忠民. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J]. 石油学报, 2002, 23(3): 23-26.  
LIN Zhongmin. Ordovician carbonate rock reservoir characteristics and reservoir forming conditions in Tahe oilfield [J]. Journal of Petroleum, 2002, 23 (3): 23-26.
- [3] 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的若干问题[J]. 石油实验地质, 2001, 25(5): 508-512.  
LU Xinbian. Some problems in the study of Ordovician Carbonate rock reservoir development geology in Tahe oilfield, Tarim Basin [J]. Petroleum Experimental Geology, 2001, 25 (5): 508-512.
- [4] 赵艳艳. 缝洞型碳酸盐岩油藏油井产量及压力变化模型[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 54-56, 62.  
ZHAO Yanyan. Oil well production and pressure change model of fractured vuggy Carbonate rock reservoir [J]. Geology of Petroleum and Natural Gas, 2010, 31 (1): 54-56, 62.
- [5] 高树生. 缝洞型碳酸盐岩储层产能方程及其影响因素分析[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 48-53.  
GAO Shusheng. Productivity equation of fracture-cavity Carbonate rock reservoir and analysis of its influencing factors [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35 (9): 48-53.
- [6] 杨瑀. 缝洞型油藏油井产能分析[J]. 断块油气藏, 2014, 21(6): 746-749.  
YANG Yu. Analysis of oil well productivity in fracture-cavity reservoirs [J]. Fault Block Oil and Gas Reservoirs, 2014, 21 (6): 746-749.
- [7] 王禹川. 碳酸盐岩缝洞型油藏产能评价方法探讨[J]. 断块油气藏, 2011, 18(5): 637-640.  
WANG Yuchuan. Discussion on productivity evaluation method of fracture-cavity reservoirs in Carbonate rock [J]. Fault Block Reservoirs, 2011, 18 (5): 637-640.
- [8] 刘曰武. 三重介质油气藏数学模型的建立及其渗流机理的研究[J]. 西南石油学院学报, 1993, 15(增 1): 87-89.  
LIU Yuewu. Establishment of a mathematical model for triple medium oil and gas reservoirs and research on their percolation mechanism [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 1993, 15 (S1): 87-89.
- [9] 林加恩. 管流与渗流耦合流动理论研究初探[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(2): 11-15.  
LIN Jiaen. Preliminary study on pipe flow and seepage coupling flow theory [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22 (2): 11-15.
- [10] 王子胜. 缝洞型油藏试井解释方法在塔河油田的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 72-74.  
WANG Zisheng. Application of well test interpretation method for fracture-cavity reservoirs in Tahe oilfield [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22 (1): 72-74.
- [11] 张冬丽. 缝洞型油藏三重介质油水两相流数值试井解释方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(6): 113-120.  
ZHANG Dongli. Numerical well test interpretation method of oil water two phase flow in triple media of fracture cavity reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2010, 32 (6): 113-120.
- [12] 蔡明金. 塔里木油田碳酸盐岩大尺度溶洞油藏试井新模型研究[J]. 油气井测试, 2014, 23(3): 5-8.  
CAI Mingjin. A new model for well test interpretation of carbonate cave reservoirs [J]. Well Testing, 2014, 23(3): 5-8.
- [13] 康志江. 缝洞型油藏洞穴内流体流动特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(3): 82-85.  
KANG Zhijiang. Fluid flow characteristics in caves of fractured and caved reservoirs [J]. Daqing Petroleum Geology and Development, 2014, 33 (3): 82-85.
- [14] 何更生. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 297.
- [15] 李传亮. 管流与渗流的统一[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(2): 252-253.  
LI Chuanliang. Unification of pipe flow and percolation [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (2): 252-253.
- [16] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 中国科学技术大学出版社, 2010, 46.
- [17] 徐燕东. 考虑重力因素的断溶体储层井-洞-缝模型试井解释方法研究[J]. 计算物理, 2020, 37(2): 189-197.  
XU Yandong. Study on well test interpretation method for well hole fracture model in fault solution reservoirs considering gravity factors [J]. Computational Physics, 2020, 37 (2): 189-197.

编辑 穆立婷

**第一作者简介:**徐燕东,男,1975 年出生,高级工程师,硕士,2005 年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发专业,现主要从事试油测试资料解释工作。电话:0991-3160090,18999831713;Email: tonnyxu2001@126.com。通信地址:新疆乌鲁木齐市长春南路中国石化西北油气生产科研园区石油工程技术研究院,邮政编码:830011。