

断块油藏高部位剩余油径向钻孔产能预测

张凯¹, 龙涛¹, 吴义志², 李萍³, 尚洋洋¹, 张黎明¹

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 3. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552)

摘要:在当前低油价形势下,费用低、时间短、效率高的径向钻孔技术受到油田重视。针对断块油藏断裂系统复杂、类型多、高部位剩余油常规开发难度大且效果差的现状,提出利用径向钻孔技术来实现对断块油藏高部位剩余油的有效开采。根据镜像反映和势叠加原理,得到径向钻孔势的表达式和孔内流动方程,通过耦合得到径向钻孔产能预测模型,并对其准确性进行验证。结果表明:径向钻孔能够实现经济有效开采;新建模型计算产量与数值模拟产量的误差小于10%,说明所建产能公式可用于预测断块油藏径向钻孔的产能;径向钻孔长度越长,其增产效果越明显;垂向多分支开采效果随油层厚度的增加而变好;随着油层厚度的增加,采油指数不断减小,径向钻孔技术更适用于薄油层开采。

关键词:低油价 断块油藏 高部位剩余油 径向钻孔 产能预测

中图分类号:TE313.8

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)05-0120-07

Productivity prediction of remaining oil in high position of fault block reservoir using radial drilling

Zhang Kai¹, Long Tao¹, Wu Yizhi², Li Ping³, Shang Yangyang¹, Zhang Liming¹

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China;
2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, Dongying City, Shandong Province, 257015, China;
3. Research Institute of Exploration and Development, Huabei Oilfield Company, Renqiu City, Hebei Province, 062552, China)

Abstract: Under the low oil prices, much attention has been paid to radial drilling because of its low cost, short time and high efficiency. In view of the present situation of its complex fracture system, various types, great difficulty and poor effect of conventional development of the remaining oil in the high position of the fault block reservoir, the radial drilling technology was proposed to realize the effective exploitation of the remaining oil. The productivity prediction model for radial drilling was built and its accuracy was verified by coupling of the expression of radial drilling potential and the equation of flow in the hole which was established according to the principle of mirror reflection and potential superposition. The results show that the radial drilling can realize the economic and effective exploitation of the remaining oil in the high position of the fault block reservoir. The error between the calculated oil production of the new model and that of the numerical simulation is less than 10%, which shows that the formula can be used to predict the productivity of the fault block reservoirs that use radial drilling technique. The larger the radial drilling length is, the better the simulation effect is. The effect of vertical multi-branch development becomes better with the increase of reservoir thickness. With the increase of reservoir thickness, the oil production index decreases gradually, and the radial drilling technique is more suitable for the thin oil reservoir exploitation.

Key words: low oil price; fault block reservoir; remaining oil in the high position; radial drilling; productivity prediction

受2014年下半年以来低油价的冲击,中外石油企业效益急剧下滑,为应对油价下跌所带来的严峻

收稿日期:2017-05-05。

作者简介:张凯(1980—),男,四川南充人,教授,博士,从事油气开发方面的研究与教学工作。联系电话:15865579293, E-mail:reservoirs@163.com。

基金项目:国家科技重大专项“复杂断块油田提高采收率技术”(2016ZX05011-002)。

考验,石油企业纷纷提出降本增效的口号^[1-2]。由于断块小且形态各异,断块油藏高部位剩余油常规开发难度大、效果差。虽然水平井和多分支水平井对断块油藏高部位剩余油开发效果不错,但由于前期投入高,作业时间长,很难在当今形势下投入到油田开发中。因此,对于进入开发中后期的油田来说,如何利用新技术经济有效开采断块油藏是亟需解决的难题。由于具有费用低、时间短、效率高的特点,日益完善的径向钻孔技术作为一项新增产技术受到油田重视。径向钻孔是根据油藏需要,借助高压水射流在油层的同一层内或多层内钻多个小直径(30~50 mm)的孔眼,形成多层多向多分支的复杂结构井。该工艺不仅可增大地层泄油面积,提高地层导流能力,实现仿水平井开发;还可有效解除近井地带损害,对储层、套管伤害小;既可以在新井中实施,也可以在老井中应用。从理论上讲,相对于常规压裂与水平井技术前期的高投入,径向钻孔技术费用低很多,而且工艺流程简单,易于操作,并能达到压裂增产效果。针对断块油藏高部位剩余油水驱动用难度大、打新井效益低的现状,为经济有效开采断块油藏高部位剩余油,提出在直井基础上进行径向钻孔,结合断块油藏高部位剩余油特点,在平面或垂向上进行辐射状多径向钻孔。

在国外,众多学者对多分支水平井产能进行了较为系统的研究,Joshil利用保角变换,建立了多分支水平井稳态产能预测公式^[3-4]。通过对Joshil公式的多次修正与改进,又建立了Giger二公式、Borisov公式和Giger Reiss Jourdan等公式^[5],Dittoe提出利用多分支水平井开采薄油藏最有利于提高采收率^[5]。而在中国,程林松等根据拟三维求解思路,利用不同的保角变换和等值渗流阻力,推导出在同一平面内对称分布的多分支水平井的解析解稳态产能公式^[6-7]。刘想平等利用微元分析法,根据镜像反映与势叠加原理,针对鱼骨井的特点,建立了半解析产能预测模型,并利用软件进行了求解^[7-8]。然而,虽然多分支水平井产能评价公式已有相关定论,但大多基于无限大油藏或简单油藏边界所建立,无法描述断块油藏高部位剩余油特点。同时,径向钻孔虽能实现仿水平井开发,但相对于多分支水平井,其在油藏中的分布情况更为复杂,且由于孔眼半径小、没有完井,径向钻孔孔内流动复杂,阻力大。目前还没有学者提出针对径向钻孔技术的产能评价公式。为此,根据断块油藏高部位剩余油边界条件,结合径向钻孔特点,利用理论研究,建立其稳态产能模型,以期对断块油藏高部位剩余油径

向钻孔产能预测提供理论依据。

1 产能模型的建立

由于断块油藏径向钻孔分支和断块边界不同,镜像反映后,其流动形态难以判断,故无法确定其产能的解析解。因此,根据油藏中任意点的势不受边界影响可进行势叠加的特点,利用势叠加原理来求解断块油藏高部位剩余油径向钻孔产能。

通过研究径向钻孔单相稳态渗流,将原油流动分为油藏渗流和孔内流动2个过程。首先,以镜像反映和势叠加原理为基础,建立断块油藏径向钻孔油藏渗流模型;然后,根据孔内复杂变质量流动特征,建立径向钻孔孔内流动压降模型。由于这2个流动过程在油藏中是相互联系、相互影响的,因此可建立其对应的耦合模型来进行产能预测;最后,通过编制相应的产能计算程序,分析不同径向钻孔条件下断块油藏的增产效果。

1.1 无限大地层水平径向分支钻孔三维稳态势的分布

假设单相原油在地层中为稳态渗流,无限大地层中的径向钻孔分支为均匀线汇,在水平1分支径向钻孔上取一微元段,当该微元段足够小时,可将其看成一个点,令该点的坐标为 (x_0, y_0, z_w) (图1),则该微元段的产量为

$$dQ = \frac{QdL}{L} \quad (1)$$

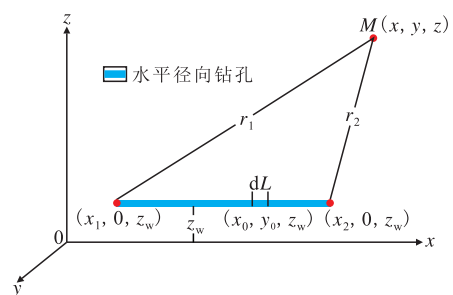


图1 无限大地层中水平径向钻孔

Fig.1 Horizontal radial drilling in an infinite formation

根据势的定义, dL 微元段在空间中任意点 $M(x, y, z)$ 产生的势^[9]为

$$d\Phi = -\frac{dQ}{4\pi r} = -\frac{Q}{4\pi L} \times \frac{dL}{r} \quad (2)$$

其中

$$r = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_w - z)^2} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y^2 + (z_w - z)^2} \quad (3)$$

根据势叠加原理,水平1分支径向钻孔产生的

势为

$$\Phi = \int_{x_1}^{x_2} -\frac{Q}{4\pi L} \times \frac{dx}{\sqrt{(x_0-x)^2 + y^2 + (z_w-z)^2}} \quad (4)$$

由图1可知, r_1 和 r_2 可分别表示为

$$r_1 = (x-x_1)^2 + y^2 + (z-z_w)^2 \quad (5)$$

$$r_2 = (x-x_2)^2 + y^2 + (z-z_w)^2 \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(4), 并对式(4)进行积分, 整理后可得

$$\Phi = -\frac{Q}{4\pi L} \ln \frac{r_2 + x_2 - x}{r_1 + x_1 - x} + C \quad (7)$$

又因为

$$\frac{r_2 - (x-x_2)}{r_1 - (x-x_1)} = \frac{r_1 + (x-x_1)}{r_2 + (x-x_2)} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)进行化简, 可得无限大地层中1分支径向钻孔在油藏中势的表达式为

$$\Phi = -\frac{Q}{4\pi L} \ln \frac{r_2 + r_1 + L}{r_2 + r_1 - L} + C \quad (9)$$

1.2 稳态渗流方程

1.2.1 钻孔分布方式

根据断层组合方式, 将断块油藏分为夹角断块和条带断块油藏(图2)。针对不同类型断块油藏, 油田实际所采取的径向钻孔分布方式不同(表1)。

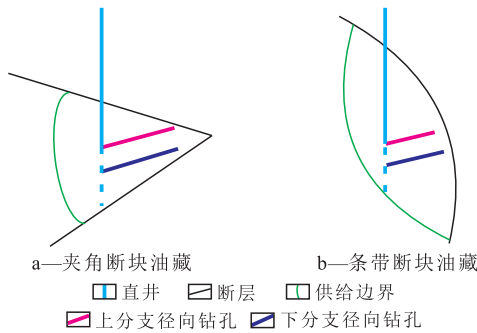


图2 断块油藏径向钻孔示意
Fig.2 Schematic diagram of radial drilling in the fault block reservoir

表1 断块油藏径向钻孔分布方式
Table1 Distribution pattern of radial drilling in the fault block reservoir

断块油藏类型	平面分支数	纵向分支数
夹角	薄油层	1
	厚油层	>1
条带	薄油层	>1
	厚油层	1

1.2.2 径向钻孔势表达式

以条带断块油藏多分支径向钻孔为例, 假设断块油藏内径向钻孔分支数为 m , 将每分支径向钻孔分成 n 个微元段; 当 n 取值足够大时, 每一微元段的流量可认为是均匀分布的, 但各微元段的流量不一定相等。据此, 通过镜像反映和势叠加原理, 推导各微元段在条带断块油藏中的势分布。

根据条带断块油藏实际情况, 油藏上下封闭, 条带宽度为 b , 径向钻孔到底界面的距离为 z_a , 距供给边界距离为 y_w 。根据镜像反映, 将条带断块油藏转换为无界空间问题以便于求解。上下封闭边界使得每一口径向钻孔在 z 方向上反映成无穷口生产径向钻孔, 其 z 坐标分别为 $2kh+z_a$ 和 $2kh-z_a$, 这些径向钻孔的 x 和 y 坐标均与原径向钻孔相同。 y 方向上, 断层(封闭)边界和定压边界组成的复合边界使得每一口径向钻孔由镜像反映成无穷口生产径向钻孔和注水径向钻孔组合, 其中生产径向钻孔的 y 坐标分别为 $4kb+y_w$ 和 $4kb+2b-y_w$; 注水径向钻孔的 y 坐标分别为 $4kb-y_w$ 和 $4kb+2b+y_w$; 同样, 这无穷口生产径向钻孔、注水径向钻孔的 x 和 z 坐标与原径向钻孔相同。故条带断块油藏空间任意点的势等于 z 方向上无穷口生产径向钻孔的势与 y 方向上无穷口生产径向钻孔和注水径向钻孔组合的势之和。根据势叠加原理, 得到条带断块油藏多分支径向钻孔在断块油藏中任意点 $M(x,y,z)$ 产生的势为

$$\Phi_M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left[\varphi(x, 0, 2kh+z_a) + \varphi(x, 0, 2kh-z_a) + \varphi(x, 4kb+y_w, 0) + \varphi(x, 4kb+2b-2y_w, 0) - \varphi(x, 4kb-y_w, 0) - \varphi(x, 4kb+2b+2y_w, 0) \right] \quad (10)$$

根据式(10), 可得1分支、2分支和4分支条带断块油藏(图3)中任意点 $M(x,y,z)$ 的势分别为

$$\Phi_M = \sum_{j=1}^n \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left[\varphi(x, 0, 2kh+z_a) + \varphi(x, 0, 2kh-z_a) + \varphi(x, 4kb+y_w, 0) + \varphi(x, 4kb+2b-2y_w, 0) - \varphi(x, 4kb-y_w, 0) - \varphi(x, 4kb+2b+2y_w, 0) \right] \quad (11)$$

$$\Phi_M = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left[\varphi(x, 0, 2kh+z_a) + \varphi(x, 0, 2kh-z_a) + \varphi(x, 4kb+y_w, 0) + \varphi(x, 4kb+2b-2y_w, 0) - \varphi(x, 4kb-y_w, 0) - \varphi(x, 4kb+2b+2y_w, 0) \right] \quad (12)$$

$$\Phi_M = \sum_{j=1}^4 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \left[\varphi(x, 0, 2kh+z_a) + \varphi(x, 0, 2kh-z_a) + \varphi(x, 4kb+y_w, 0) + \varphi(x, 4kb+2b-2y_w, 0) - \varphi(x, 4kb-y_w, 0) - \varphi(x, 4kb+2b+2y_w, 0) \right] \quad (13)$$

90°夹角断块油藏1分支径向钻孔经过镜像反映后, 在 z 方向上反映成无穷口生产径向钻孔, 而这

无穷口生产径向钻孔的 z 坐标分别为 $2kh+z_w$ 和 $2kh-z_w$, 而平面上镜像反映成对称分布的4对分支

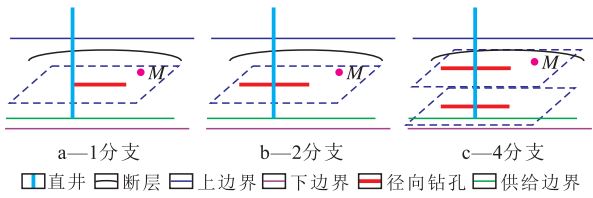


图3 条带断块油藏1,2,4分支径向钻孔示意

Fig.3 One-, two- and four-branch radial drilling in the banding fault block reservoir

水平径向钻孔。故90°夹角断块油藏中任意点的势等于z方向上无穷口径向钻孔的势和平面上对称分布的4分支水平径向钻孔的势之和,其表达式为

$$\Phi_M = \sum_{j=1}^n \sum_{k=-\infty}^{\infty} [\varphi(x, 0, 2kh + z_a) + \varphi(x, 0, 2kh - z_a)] + \sum_{j=1}^n \varphi(x, 0, z_w) + 2 \sum_{j=1}^n \varphi(L, y, z_a) \quad (14)$$

综上所述,由于镜像反映,不同断块油藏势的表达式完全不同,而在同一断块油藏中,虽然1分支径向钻孔在油藏所产生的势表达式相同,但由于径向钻孔分支数不同,根据势叠加原理,油藏势的表达式累加值也不同。

1.3 径向钻孔孔内流动方程

由于流体沿径向钻孔流入孔内,使得孔内质量流量不断增加,因此孔内的压降主要包括孔内沿程摩擦压降、变流量引起的加速度压降以及重力压降^[10-11]。因径向钻孔半径很小,故不考虑重力压降。

1.3.1 沿程摩擦压降

径向钻孔沿程摩擦压降计算过程主要包括:根据各分支径向钻孔微元段的流量,得到各分支径向钻孔微元段的流速,求得各微元段所对应的雷诺数^[12];由于流体的流动状态不同,导致流体的摩擦系数不同,通过流入矫正系数^[13]对径向钻孔流动摩擦系数进行校正,得到各分支径向钻孔微元段的沿程摩擦压降表达式为

$$\Delta p_{f1} = \frac{f \rho v^2}{2D} \quad (15)$$

径向钻孔虽然能实现仿水平井开发,但相对于水平井,其钻孔半径更小,而且由于没有完井和受径向钻孔技术影响,其摩擦压降明显更大,为此引入修正系数c来修正壁面摩擦系数^[14],考虑各因素的综合影响,对式(15)进行修正,即得

$$\Delta p_{f1} = c \Delta p_{f1} = \frac{c f \rho v^2}{2D} \quad (16)$$

1.3.2 加速度压降

变质量流的质量增加,将导致径向钻孔中有一部分流体的压能转化成动能,从而产生加速度压降。其加速度压降的表达式^[15]为

$$\Delta p_a = \rho(v_j^2 - v_{j-1}^2) \quad (17)$$

分支径向钻孔中所产生的压降之和为

$$\Delta p = \Delta p_{f1} + \Delta p_a \quad (18)$$

1.4 耦合方程

在径向钻孔微元段的中心处,油藏渗流压力等于径向钻孔孔内流压,整个稳态产能模型以此为依据进行耦合^[16],其表达式为

$$\begin{cases} \Delta p + p_{ij} = p_e \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{ij} = q_w \end{cases} \quad (19)$$

分支径向钻孔孔内微元段的流压^[17]为

$$p_{ij} = \lambda q_{ij} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} \quad (20)$$

其中

$$\lambda = \frac{\mu}{4\pi K d L} \quad (21)$$

结合式(19),将式(20)变形可得

$$q_{ij} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi_{ij} = \frac{1}{\lambda} p_{ij} = \frac{1}{\lambda} (p_e - \Delta p) \quad (22)$$

令 $q = q_{ij}$, $A = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}$, $B = \frac{1}{\lambda} (p_e - \Delta p)$, 式(22)可写成 $Aq = B$ 的形式^[18]。分支数为m的径向钻孔各微元段的产量q可写成列向量,即

$$q = q_{ij} = [q_{11}, q_{12}, \dots, q_{1n}, q_{21}, \dots, q_{mn}]^T \quad (23)$$

同理, A 和 B 的表达式分别为

$$A = \begin{bmatrix} \varphi_{1,1} & \varphi_{1,2} & \dots & \varphi_{1,n} & \dots & \varphi_{1,mn} \\ \varphi_{2,1} & \varphi_{2,2} & \dots & \varphi_{2,n} & \dots & \varphi_{2,mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{n,1} & \varphi_{n,2} & \dots & \varphi_{n,n} & \dots & \varphi_{n,mn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{m,1} & \varphi_{m,2} & \dots & \varphi_{m,n} & \dots & \varphi_{m,mn} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$B = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} p_e - \Delta p_{11} \\ p_e - \Delta p_{12} \\ \vdots \\ p_e - \Delta p_{1n} \\ \vdots \\ p_e - \Delta p_{mn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

由初始值 $p_0 = [p_{wf1}, p_{wf2}, \dots, p_{wfn}]$ 开始求解方程组^[19],计算每一微元段的流量,应用迭代法依次产生新的压力和流量,直至p和q的改变量小于一定的误差^[20],即

$$\begin{cases} \max_{1 \leq i \leq n} |q_i^{n+1} - q_i^n| < \varepsilon \\ \max_{1 \leq i \leq n} |p_{wf}^{n+1} - p_{wf}^n| < \varepsilon_1 \end{cases} \quad (26)$$

2 模型验证与产量影响因素

2.1 模型验证

实际断块油藏属性参数包括:油层厚度为5 m,渗透率为600 D,地层流体粘度为5 mPa·s,储层压

力为20 MPa,井底流压为18 MPa。受径向钻孔技术限制,目前径向钻孔的最大长度为100 m,验证模型所采用的径向钻孔长度为100 m,直径为40 mm,油藏条带宽度为200 m,径向钻孔距断层的距离为50 m。根据所建多分支径向钻孔产能模型,用Matlab编制了相应的计算程序,对条带断块油藏进行数值模拟。对比分析条带断块油藏产能模型和数值模拟计算产量,验证模型的准确性。

由图4可见:产能模型求取的1分支径向钻孔各微元段的产量不同,受各微元段势的干扰,两端产量较大,中间产量最低;同时由于孔内压降的影响,曲线是不对称的,根端产量大于趾端产量。在定井底流压(18 MPa)条件下,孔内压力从径向钻孔趾端到根端逐渐降低,且由于沿孔内流动方向流体质量逐渐增加,阻力增大,压降越来越大(图4)。

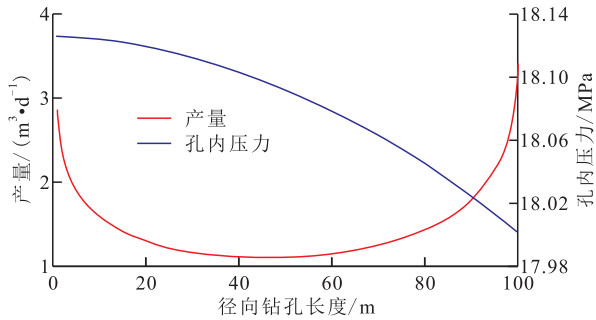


图4 1分支径向钻孔各微元段产量和孔内压力

Fig.4 Oil production and pore pressure of each infinitesimal section of one-branch radial drilling

对比分析条带断块油藏3种不同分支径向钻孔产能模型产量与数值模拟计算产量(图5)可知:新建产能模型预测产量变化趋势与数值模拟计算产量变化趋势一致,且两者误差小于10%,说明新建产能模型可用于预测断块油藏径向钻孔的产能。

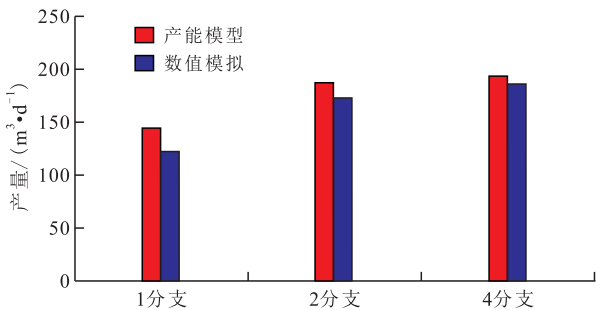


图5 不同分支径向钻孔产能模型与数值模拟计算产量对比

Fig.5 Comparison of the calculated production using different radial drilling branch models and numerical simulation

2.2 影响因素

径向钻孔长度 分析径向钻孔对断块油藏高部位剩余油开采效果(图6)可知:当径向钻孔分支

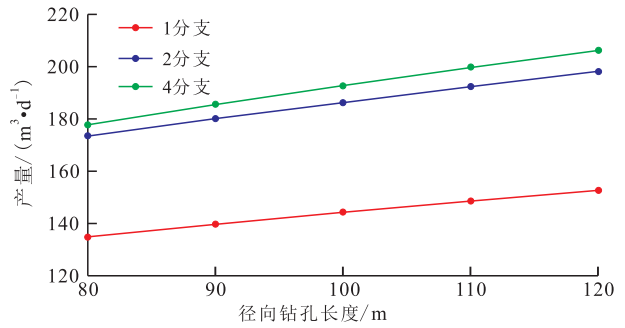


图6 不同分支径向钻孔产量随径向钻孔长度变化

Fig.6 Variation of production with radial drilling length using different radial drilling branch number

数相同时,产量随径向钻孔长度的增加而增加;当径向钻孔长度相同时,产量随径向钻孔分支数的增多而增加。这是因为,径向钻孔长度越长、分支数越多,其油藏泄油面积越大,导流能力越强,产量越大,开发效果越好。

油层厚度 利用产能模型预测不同垂向分支数下油层厚度与产量的关系,结果(图7)表明,当断块油层厚度较小时,条带断块油藏在垂向上进行径向多分支钻孔的效果不明显,但随着油层厚度的增加,其垂向分支数间产量差别越来越明显,当油层厚度大于10 m时,在垂向上进行多分支径向钻孔的效果要远远好于只在同一平面上进行径向钻孔。

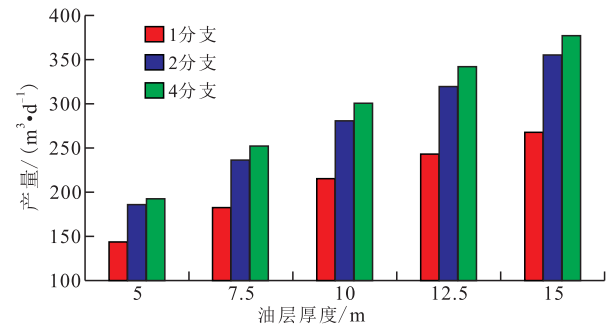


图7 不同垂向分支数下径向钻孔产量随油层厚度的变化

Fig.7 Variation of production with reservoir thickness using different radial drilling branch number

利用产能模型分析断块油藏径向钻孔采油指数随油层厚度的变化(图8)可知,对于4分支径向钻

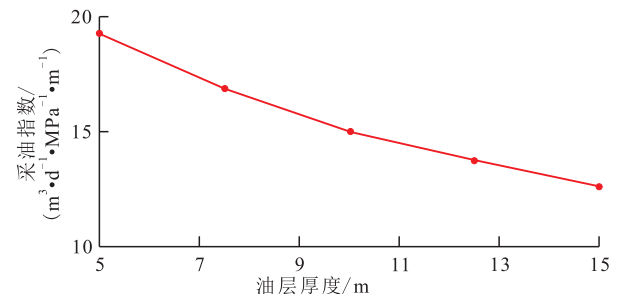


图8 4分支径向钻孔采油指数随油层厚度的变化

Fig.8 Variation of oil production index with reservoir thickness using four-branch radial drilling

孔,由于径向钻孔直径小,随着油层厚度的增加,相对于油藏体积,径向钻孔的泄油面积比例减小,流动阻力增大,故采油指数减小。说明多分支径向钻孔技术更适用于薄油层断块油藏的开采。

3 结论

根据不同断块油藏类型,分别建立不同径向钻孔分支产能模型。对比产能模型与数值模拟计算结果发现,条带断块油藏随着径向钻孔分支数增加,油藏产量增加。研究表明,在径向钻孔分支数相同的情况下,径向钻孔长度越长,开发效果越好。当油层厚度较小时,在垂向上进行径向多分支钻孔的效果不是很明显,但当油层厚度大于10 m时,在垂向上进行多分支径向钻孔的效果好于只在同一平面上进行径向钻孔。随着油层厚度的增加,采油指数不断减小,说明多分支径向钻孔技术更适用于薄油层断块油藏的开采。

符号解释:

Q ——径向钻孔产量, m^3/d ; L ——径向钻孔长度, m ;
 x ——径向钻孔横向距离, m ; y ——径向钻孔纵向距离, m ;
 z ——径向钻孔垂向距离, m ; z_w ——径向钻孔到 x 轴的距离, m ; r_1 ——地层中任意点到径向钻孔根端的距离, m ;
 r_2 ——地层中任意点到径向钻孔趾端的距离, m ; Φ ——径向钻孔在地层中任意点产生的势, m^2/s ; r ——地层中任意点到径向钻孔的距离, m ; C ——积分常数; b ——条带宽度, m ;
 z_a ——径向钻孔到底界面的距离, m ; y_w ——径向钻孔到供给边界的距离, m ; k ——镜像反映次数, $k=1, 2, 3, \dots, 100$;
 h ——油层厚度, m ; Φ_M —— M 点处的势, m^2/s ; i ——径向钻孔数, 个; m ——径向钻孔分支数, 个; j ——各径向钻孔微元段编号; n ——每分支径向钻孔微元段总数; φ ——地层任意点到径向钻孔各微元段距离之和, m ; Δp_f ——沿程摩擦压降, MPa ; f ——摩擦系数; ρ ——地层流体密度, kg/m^3 ; v ——流速, m^3/s ; D ——径向钻孔直径, m ; c ——修正系数; Δp_t ——修正沿程摩擦压降, MPa ; Δp_a ——加速度压降, MPa ; v_j ——第 j 个微元段的流速, m^3/s ; Δp ——总压降, MPa ; p_{ij} —— ij 微元段处流压, MPa ; p_e ——供给边界压力, MPa ; q_{ij} —— ij 微元段处的产量, m^3/d ; q_w ——全井产量, m^3/d ; λ ——产量系数; φ_{ij} —— ij 微元段与径向钻孔各微元段距离之和, m ; μ ——地层流体粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; K ——油藏渗透率, D ; p_{wf} ——井底流压, MPa ; p_{wj} ——微元段 j 处的压力, MPa ; ε ——产量误差; ε_1 ——压力误差。

参考文献:

[1] 康小军,李兆敏,刘志斌.随机油价下的油田开发规划优化模

型[C].全国特种油气藏技术研讨会,2006.

Kang Xiaojun, Li Zhaomin, Liu Zhibin. Optimization model of oil-field development planning under stochastic oil price [C]. National Symposium on Special Oil and Gas Reservoirs, 2006.

[2] 陈欢庆.低油价背景下油田开发研究的几点思考[J].西南石油大学学报:社会科学版,2016,18(3):19-26.

Chen Huanqing. Reflections on oilfield exploitation and research in the context of low oil prices [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Social Sciences Edition, 2016, 18(3): 19-26.

[3] Joshi S D. A review of horizontal well and drainhole technology [C]. SPE 16868, 1988.

[4] Joshi S D. Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells [J]. Journal of Petroleum Technology, 1986, 8(6): 729-739.

[5] 陈要辉.分支井汇流特性及产能预测研究[D].大庆:大庆石油学院,2002.

Chen Yaohui. The research of confluence character and productivity prediction of multilateral wells [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2002.

[6] 程林松,李春兰,郎兆新,等.分支水平井产能的研究[J].石油学报,1995,16(2):49-55.

Cheng Linsong, Li Chunlan, Lang Zhaoxin, et al. The productivity study of branch a horizontal well with multiple branched wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(2): 49-55.

[7] 刘想平,张兆顺,崔桂香,等.鱼骨型多分支井向井流动态关系[J].石油学报,2000,21(6):129-130.

Liu Xiangping, Zhang Zhaoshun, Cui Guixiang, et al. Inflow performance relationship of a herringbone multilateral well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 129-130.

[8] Salas J R, Clifford P J, Jenkins D P. Multilateral well performance prediction [C]. SPE 35711, 1996.

[9] 李沁阳.裸眼系列完井方式下辐射状多分支井产能研究[D].成都:西南石油大学,2015.

Li Qinyang. Study on the productivity of radial multi-branch wells with open-hole completion [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.

[10] 杨小松,刘传喜,严谨,等.鱼骨型多分支水平气井产能规律研究[J].石油学报,2008,29(5):727-733.

Yang Xiaosong, Liu Chuanxi, Yan Jin, et al. Research on productivity law of herringbone multilateral gas well [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(5): 727-733.

[11] 程林松,李春兰,马志远.气藏多分支水平井产能的计算方法[J].石油学报,1998,19(4):69-72.

Cheng Linsong, Li Chunlan, Ma Zhiyuan. A method for calculating the productivity of multiwellbore horizontal wells in gas reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(4): 69-72.

[12] 赵立新,蒋明虎,赵雪峰,等.复杂结构水平井产能关系研究[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(3):77-80.

Zhao Lixin, Jiang Minghu, Zhao Xuefeng, et al. Research on deliverability relationship of complicated horizontal well [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2006, 30(3): 77-80.

[13] 王硕,戴俊生,付晓龙,等.渤海油田五区沙三段现今地应力场

- 数值模拟及影响因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3):26-32.
- Wang Shuo, Dai Junsheng, Fu Xiaolong, et al. Numerical simulation research on current stress of E_{s3} of the 5th block of Bonan oilfield and analysis of its influence factors [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(3):26-32.
- [14] 刘剑, 刘月田, 聂彬, 等. 潜山油藏水平井立体井网井距调整方法[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4):103-108.
- Liu Jian, Liu Yuetian, Nie Bin, et al. Method of well spacing adjustment for stereo horizontal well pattern in buried hill reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4):103-108.
- [15] 尚颖雪, 李晓平, 张烈辉. 稠油油藏冷采水平井产能影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(6):85-90.
- Shang Yingxue, Li Xiaoping, Zhang Liehui. Influencing factors on horizontal wells productivity by cold production in heavy oil reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(6):85-90.
- [16] 何吉祥, 姜瑞忠, 孙洁, 等. 页岩气藏压裂水平井产量影响因素评价[J]. 特种油气藏, 2016, 23(4):96-100.
- He Jixiang, Jiang Ruizhong, Sun Jie, et al. Multi-stage fractured horizontal well productivity evaluation in shale gas reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2016, 23(4):96-100.
- [17] 胡永全, 陈星, 王楨. 低渗透气藏压裂水平井产量计算新模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(1):73-78.
- Hu Yongquan, Chen Xing, Wang Zhen. A new production model of fractured horizontal well in low-permeability gas reservoir [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(1):73-78.
- [18] 李龙龙, 姚军, 吴明录. 考虑压裂液污染的低渗透垂直井产能计算[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(1):79-82.
- Li Longlong, Yao Jun, Wu Minglu. Productivity calculation for the vertically fractured wells considering the damage by the fracturing fluid [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2015, 34(1):79-82.
- [19] 黎静容, 朱桦, 冯晓明, 等. 川东北陆相储层裂缝特征差异性及其对产能的影响[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6):742-747.
- Li Jingrong, Zhu Hua, Fen Xiaoming, et al. Differences of fracture characteristics and the influence on productivity in the northeastern Sichuan continental basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(6):742-747.
- [20] 王晓冬, 于国栋, 李治平. 复杂分支水平井产能研究[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(6):729-733.
- Wang Xiaodong, Yu Guodong, Li Zhiping. Productivity of horizontal wells with complex branches [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(6):729-733.

编辑 常迎梅

(上接第119页)

- [8] Kayumov R E, Klyubin A, Enkababian P, et al. First channel fracturing applied in mature wells increases production from Talinskoe oilfield in Western Siberia [C]. SPE 159347, 2012.
- [9] Rahim Z, Al-Kanaan A, Kayumov R, et al. Channel fracturing technology provides an effective solution to unlock tight gas development and production potential in Saudi Arabia [C]. SPE 180123, 2016.
- [10] 张涛, 王晓惠, 毛新军, 等. 高速通道压裂技术在新疆油田致密油储层应用效果分析[J]. 钻采工艺, 2014, 37(6):55-57.
- Zhang Tao, Wang Xiaohui, Mao Xinjun, et al. Analysis of application effect of high-speed channel fracturing technology in tight oil reservoir of Xinjiang Oilfield [J]. *Drilling & Production Technology*, 2014, 37(6):55-57.
- [11] 刘向军. 高速通道压裂工艺在低渗透油藏的应用[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(2):122-126.
- Liu Xiangjun. Application of Hiway technology in the low permeability reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(2):122-126.
- [12] 戚斌, 杨衍东, 任山, 等. 脉冲柱塞加砂压裂新工艺及其在川西地区的先导试验[J]. 天然气工业, 2015, 35(1):67-73.
- Qi Bin, Yang Yandong, Ren Shan, et al. A new technology in impulse-stage sand fracturing and its pilot application in western Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1):67-73.
- [13] 钱斌, 尹丛彬, 朱炬辉, 等. 高效脉冲式加砂压裂技术研究与实践[J]. 天然气工业, 2015, 35(5):39-45.
- Qian Bin, Yin Congbin, Zhu Juhui, et al. Research and practice of the impulse sand fracturing technology [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(5):39-45.
- [14] Medvedev A V, Kraemer C C, Pena A A, et al. On the mechanisms of channel fracturing [C]. SPE 163836, 2013.
- [15] 温庆志, 高金剑, 黄波, 等. 通道压裂砂堤分布规律研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(4):89-92.
- Wen Qingzhi, Gao Jinjian, Huang Bo, et al. Research on distribution pattern of sand bank for channel fracturing [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2014, 21(4):89-92.

编辑 王星