

低渗透普通稠油油藏水平井极限动用半径

——以叙利亚 Oudeh 油田为例

孙璐¹, 刘月田¹, 陈民锋¹, 葛涛涛²

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 渤海石油研究院, 天津 300450)

摘要: 叙利亚 Oudeh 油田低渗透普通稠油油藏开发中存在明显的启动压力梯度, 影响储量动用。油藏采用天然能量水平井开发方式, 开展启动压力梯度对水平井极限动用半径影响的研究很有必要。为了研究启动压力梯度对开发的影响, 首先, 通过室内实验确定油藏启动压力梯度, 得到启动压力梯度与流度的关系。其次, 基于水平井椭圆流动的拟三维方法, 建立考虑启动压力梯度的水平井 xy 平面和 yz 平面的压力梯度计算模型; 最后, 采用稳态逐次逼近非稳态的方法, 确定油藏水平井的极限动用半径; 同时, 建立水平井在拟三维中的极限动用半径图版。研究结果表明, 除原油粘度高这一因素外, 启动压力梯度是低渗透普通稠油油藏油井动用程度低的另一主要因素; 水平井中的流体在 xy 平面上为线性流动, 在 yz 平面上近似为径向流动, 水平井在 xy 平面上的极限动用半径明显大于 yz 平面上的极限动用半径。在低渗透普通稠油油藏水平井开发中, 需全面考虑水平井在 xy 平面和 yz 平面上极限动用半径与储层厚度之间的匹配关系, 合理部署井网, 以达到扩大油藏整体动用范围的目的。

关键词: 低渗透普通稠油油藏 水平井 天然能量开发 启动压力梯度 极限动用半径

中图分类号: TE348

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2016)03-0089-06

Limit drainage radius of horizontal well in low-permeability common heavy oil reservoir: A case of Oudeh oilfield, Syria

Sun Lu¹, Liu Yuetian¹, Chen Minfeng¹, Ge Taotao²

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing City, 102249, China; 2. Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch, CNOOC China Limited, Tianjin City, 300450, China)

Abstract: Obvious threshold pressure gradient exists during the development of low-permeability common heavy oil reservoir in Oudeh oilfield of Syria, which affects the producing degree of reserves. It is very important to study the influence of threshold pressure gradient on limit drainage radius of horizontal wells in the oil reservoir developed by natural energy and horizontal well. In order to comprehensively study the effect of the threshold pressure gradient on reservoir development law, first of all, the threshold pressure gradient was determined by the laboratory experiment, and its relation with mobility was known. Secondly, based on the quasi-three-dimensional ideas on ellipse flow in horizontal well, pressure gradient model of horizontal well in xy and yz plane considering threshold pressure gradient was set up. Finally, the limit drainage radius of the horizontal wells in oil reservoir was determined by using the method of steady state approximating non steady state. At the same time, the limit drainage radius chart of the horizontal wells in the quasi-three dimension was established. The research results show that the threshold pressure gradient of low-permeability common heavy oil reservoir is another major factor of low producing degree besides the factor of high viscosity of crude oil. The fluid flow of horizontal well in the xy plane is a linear flow, and that in the yz plane is a radial flow. The limit drainage radius of the horizontal well in the xy plane was larger than that in the yz plane. During the development by horizontal well in the low-permeability common

收稿日期: 2016-03-02。

作者简介: 孙璐(1988—), 女, 山西永济人, 在读博士研究生, 从事油藏渗流机理、数值模拟及开发系统工程方面的研究。联系电话: (010) 89732260, E-mail: sunlstudent@126.com。

基金项目: 国家“973”计划“陆相致密油高效开发基础研究”课题五之专题一“致密油藏产能预测方法”(2015CB250905), 国家自然科学基金项目“各向异性裂缝页岩气藏渗流机理与理论研究”(51374222)。

heavy oil reservoir, the matching relationship between the reservoir thickness and the limit drainage radius of the horizontal well in the xy plane and yz plane should be considered fully in order to achieve the purpose of expanding the scope of producing reservoir.

Key words: low-permeability common heavy oil reservoir; horizontal well; natural energy development; threshold pressure gradient; limit drainage radius

低渗透普通稠油油藏是低渗透油藏研究的一个重要发展方向,在其开发过程中存在明显的启动压力梯度^[1-4]。为了节约投入成本,降低经济风险,对于油层厚度大、天然能量充足的低渗透普通稠油油藏,在开发初期常依靠天然能量开采;同时结合辅助措施实现油井正常生产和油藏的有效开发^[3-4]。叙利亚 Oudeh 油田的主力油层为中浅层灰岩稠油油层,埋深为 1 400~1 800 m,原始地层压力为 15 MPa,储层孔隙度为 18%~25%,渗透率为 $4 \times 10^{-3} \sim 159 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均有效厚度为 60 m,50 °C 下地面脱气原油粘度为 100 mPa·s,属中孔低渗透孔隙性储层,主体区域的流度为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$,开发中水平井平均水平段长度为 400 m。在该油田开发井型已确定为水平井的情况下,井位优化部署是提高天然能量开采效果的关键^[5-8]。因此,考虑启动压力梯度条件下的水平井天然能量开采研究,确定平面和垂向上储层的极限动用半径对指导水平井井位优化部署是非常重要的。

针对这一问题,首先,全面分析低渗透普通稠油油藏启动压力梯度曲线变化特征;其次,基于稳态条件下的水平井开发渗流理论^[9],结合拟三维方法^[10],建立低渗透普通稠油油藏水平井的压力梯度计算模型;最后,采用稳态逐次逼近非稳态的方法,确定 Oudeh 油田主力油层内水平井天然能量开采时的极限动用半径。

1 启动压力梯度与流度的关系实验

已有实验结果及现场应用结果表明^[1-4],油藏条件下的稠油渗流并不符合达西渗流,表现为当稠油受到的驱动压力梯度超过一定的临界值之后,稠油才能流动,这与低渗透油气藏的启动压力梯度现象类似。为了确定 Oudeh 油田水平井的极限动用半径,需要确定主力油层的启动压力梯度与流度的关系。实验采用 Oudeh 油田主力油层原油样品,启动压力梯度实验测试装置(图 1)主要包括注入系统、驱替系统和测量系统 3 部分。通过实验室测量启动压力梯度的方法——压差流量法,测定一定压差下的稳态流量,再利用数学方法求得启动压力梯

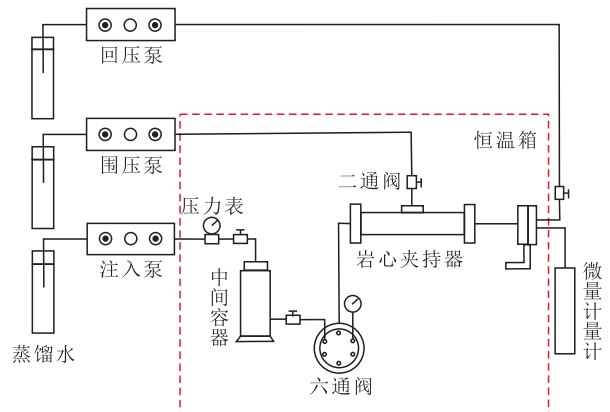


图 1 启动压力梯度实验测试装置示意

Fig.1 Schematic diagram of testing experiment device for threshold pressure gradient

度^[3-4]。实验结果表明,在双对数坐标下,启动压力梯度 ($\Delta p/L$) 与流度 (K/μ) 之间满足线性关系(图 2)。对于 Oudeh 油田低渗透普通稠油油藏主力油层的原油来说,在流度较大时其启动压力梯度非常小;在流度较小时,其启动压力梯度急剧增大。启动压力梯度与流度的关系用对数形式表示为

$$\ln \frac{\Delta p}{L} = -0.9293 \ln \frac{K}{\mu} - 4.1647 \quad (1)$$

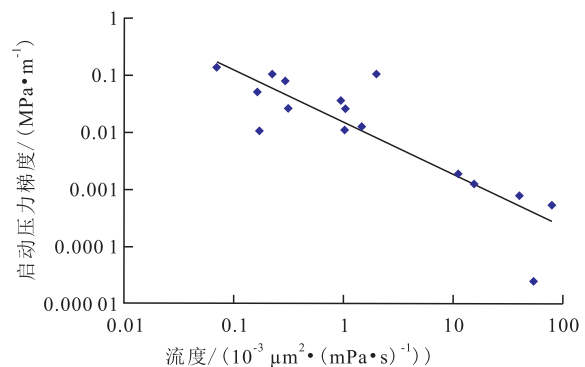


图 2 启动压力梯度与流度的关系

Fig.2 Relationship between threshold pressure gradient and mobility

2 考虑启动压力梯度的水平井压力计算公式推导

在稳定渗流的假设条件下,结合拟三维方法以及流体在储层内渗流场的分布特征,将水平井的椭圆形驱动范围相应地划分出 xy 平面与 yz 平面 2 个不

相同却连续的渗流阻力区。根据镜像反映(图3)和叠加原理研究 xy 平面和 yz 平面的流体渗流。

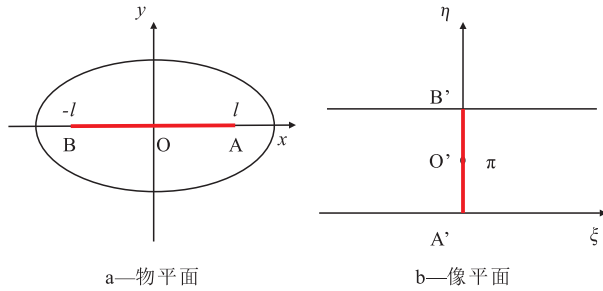


图3 xy 平面上水平井保角变换示意

Fig.3 Conformal transformation of horizontal well in xy plane

2.1 xy 平面上压力及压力梯度公式推导

设 xy 平面上有1口水平井(图3a),水平井井段的长度为 $2l$,油井半径为 r_w ,油层厚度为 h ,水平井距油层底部距离为 d 。由保角变换,将上半 xy 平面转换为 $\xi\eta$ 平面中宽度为 π 的带状油层($\xi > 0$)。A,O,B点与A',O',B'分别对应^[9]。

根据考虑启动压力梯度的直井产量公式^[11],得 xy 平面水平井产量公式为

$$Q_{xy} = \frac{2\pi Kh(p_{wi} - p_{wf} - G\xi)}{\mu\xi} \quad (2)$$

由 xy 平面的势函数、椭圆供给边界(椭圆短轴)(图3b)与椭圆长轴及水平井半长之间的关系式^[9],得到椭圆供给边界的表达式,将其代入式(2),得

$$Q_{xy} = \frac{2\pi Kh \left(p_{wi} - p_{wf} - G \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l} \right)}{\mu \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l}} \quad (3)$$

另外,将边界条件 $x=0, y=-b$ 代入 xy 平面势函数^[9],得到椭圆供给边界上的势为

$$\Phi_{x=0, y=-b} = \frac{Q_{xy}}{2\pi h} \operatorname{arch} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{b^2}{l^2} + \sqrt{\left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} + C = \frac{Q_{xy}}{2\pi h} \operatorname{arch} \left(1 + \frac{b^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} + C \quad (4)$$

当 $x=0$ 时,任意 $0 < y < b$ 处的势为

$$\Phi_y = \frac{K}{\mu} p(0, y) = \frac{Q_{xy}}{2\pi h} \operatorname{arch} \left(1 + \frac{y^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} + C \quad (5)$$

由 $x=0, y=0$,可得水平井井底的势为

$$\Phi_{x=0, y=0} = \frac{K}{\mu} p_{wf} = \frac{Q_{xy}}{2\pi h} \operatorname{arch} 1 + C \quad (6)$$

由式(5)和式(6)相减,得到椭圆供给边界与水平井井底的势差为

$$\Delta\Phi_1 = \frac{K}{\mu} (p(0, y) - p_{wf}) = \frac{Q_{xy}}{2\pi h} \operatorname{arch} \left(1 + \frac{y^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

由式(7)可确定沿椭圆短轴 y 方向的压力表达式为

$$p(0, y) = p_{wf} + \frac{Q_{xy}\mu}{2\pi Kh} \operatorname{arch} \left(1 + \frac{y^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

采用稳态逐次逼近非稳态方法,可将式(3)代入式(8),得到定压差条件下沿椭圆短轴 y 方向的压力表达式为

$$p(0, y) = p_{wf} + \frac{p_{wi} - p_{wf} - G \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l}} \operatorname{arch} \left(1 + \frac{y^2}{l^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

对式(9)求导,得到 xy 平面上任意位置处压力梯度表达式为

$$\frac{dp}{dy} = \frac{p_{wi} - p_{wf} - G \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l}}{\ln \frac{a + \sqrt{a^2 - l^2}}{l}} \times \frac{1}{l \sqrt{1 + \frac{y^2}{l^2}}} \quad (10)$$

2.2 yz 平面上压力及压力梯度公式推导

设 yz 平面水平井距油层底部距离为 d ,点汇可镜像反映为 yz 平面一排无限口水平井的问题^[9]。将边界条件井壁某点 $(0, d-r_w)$ 代入 yz 平面势函数^[9],得井壁处的势为

$$\Phi_w = \frac{Q_{yz}}{8\pi l} \ln \left(\frac{\pi r_w \sin \frac{\pi d}{h}}{h} \right)^2 + c_1 \quad (11)$$

在远离井壁某点 $(Y, d-r_w)$,得该点的势为

$$\Phi_1 = \frac{Q_{yz}}{8\pi l} \times \ln \left[\left(\cos \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{\pi r_w}{h} \right) \left(\cos \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{2\pi d}{h} \right) \right] + c_1 \quad (12)$$

由式(12)与式(11)相减,得井壁与点 $(Y, d-r_w)$ 的势差为

$$\Delta\Phi_2 = \frac{K}{\mu} \Delta p(G) = \frac{Q_{yz}}{8\pi l} \times \left\{ \ln \left[\left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{\pi r_w}{h} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{2\pi d}{h} \right) \right] - \ln \left(\frac{\pi r_w \sin \frac{\pi d}{h}}{h} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

因此,得到生产压差 $\Delta p(G)$ (由 xy 平面压力计算确定)与 yz 平面产量 Q_{yz} 之间的关系式为

$$\frac{\Delta p(G)}{\frac{Q_{yz}}{2l}} = \frac{\mu}{4\pi K} \times \left\{ \ln \left[\left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{\pi r_w}{h} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{2d\pi}{h} \right) \right] - \ln \left(\frac{\pi r_w}{h} \sin \frac{\pi d}{h} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

另外,由yz平面的势函数^[9],可确定yz平面内任意位置处压力的表达式为

$$p(0,z) = p_{wf} + \Delta p(G) \left\{ \ln \left[\left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{\pi r_w}{h} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{2d\pi}{h} \right) \right] - \ln \left(\frac{\pi r_w}{h} \sin \frac{\pi d}{h} \right)^2 \right\}^{-1} \times \left\{ \ln \left[\left(1 - \cos \frac{\pi(z-d)}{h} \right) \left(1 - \cos \frac{\pi(z+d)}{h} \right) \right] - \ln \left(\frac{\pi r_w}{h} \sin \frac{\pi d}{h} \right)^2 \right\} \quad (16)$$

对式(16)求导,得到水平井在yz平面任意位置

$$\frac{dp}{dz} = \Delta p(G) \left\{ \ln \left[\left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{\pi r_w}{h} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi Y}{h} - \cos \frac{2d\pi}{h} \right) \right] - \ln \left(\frac{\pi r_w}{h} \sin \frac{\pi d}{h} \right)^2 \right\}^{-1} \times \left[\frac{1}{1 - \cos \frac{\pi(z-d)}{h}} \right] \left[\frac{1}{1 - \cos \frac{\pi(z+d)}{h}} \right] \times \left\{ \frac{\pi}{h} \left[1 - \cos \frac{\pi(z-d)}{h} \right] \sin \frac{\pi(z+d)}{h} + \frac{\pi}{h} \left[1 - \cos \frac{\pi(z+d)}{h} \right] \sin \frac{\pi(z-d)}{h} \right\} \quad (17)$$

$$\frac{K}{\mu} (p(y,z) - p_{wf}) = \frac{Q_{yz}}{8\pi l} \times \left\{ \ln \left[\left(\operatorname{ch} \frac{\pi y}{h} - \cos \frac{\pi(z-d)}{h} \right) \left(\operatorname{ch} \frac{\pi y}{h} - \cos \frac{\pi(z+d)}{h} \right) \right] - \ln \left(\frac{\pi r_w}{h} \sin \frac{\pi d}{h} \right)^2 \right\} \quad (15)$$

将式(14)代入式(15),并令y=0,可得yz平面沿径向的压力表达式为

3 极限动用半径确定

由式(16)可得出yz平面上的地层压力分布。由yz平面上的压力分布等值线(图4)可以看出,沿着y轴方向上的压力分布代表了水平井在地层平面上的压力分布情况,压力分布边界即对应平面极限动用半径;同理,沿着z轴方向上的压力分布代表了水平井在地层垂向上的压力分布情况,压力分布边界即对应垂向极限动用半径。由不同等压线在y轴和z轴的间距分布特征可判断,在xy平面上流体呈线性流动,在yz平面上流体呈近似径向流动。xy平面上流体渗流阻力小于yz平面上的渗流阻力,因此,水平井在xy平面上的极限动用半径将明显大于

yz平面上的极限动用半径。由于平面极限动用半径和垂向极限动用半径是沿着y轴和z轴方向的单方向指标,因此,在油田部署水平井井位时,水平井在平面上的井距应小于2倍的平面极限动用半径;同时在垂向上对比储层厚度与2倍的垂向极限动用半径,从而确定在垂向上部署一套或多套井网。

对于水平井生产中的每一个压力波及状态,压力传播距离井筒最远处的压力梯度为压力传播范围内的最小值,因此,可以确定出不同压力传播范围内的最小压力梯度分布情况。同时,结合Oudeh油田启动压力梯度实验结果,能够确定水平井在xy平面和yz平面上的极限动用半径。结合稳态逐次逼近非稳态方法,取水平井段长度为400 m,储层厚度为60 m,生产压差分别为2,5和8 MPa进行计算。

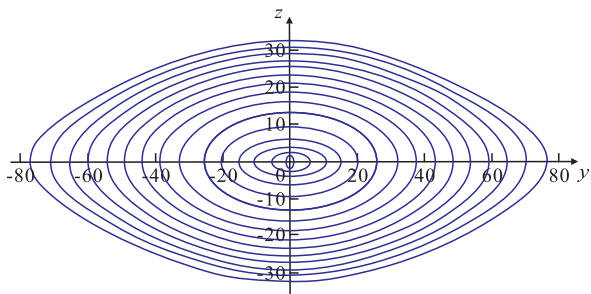


图4 yz平面上压力分布等值线
Fig.4 Isopleth of pressure in yz plane

3.1 xy平面极限动用半径

根据xy平面上压力梯度分布,可确定不同生产压差下不同压力传播范围内的最小压力梯度。由图5可见,当生产压差为2 MPa,启动压力梯度为0.03~0.1 MPa/m时,xy平面极限动用半径为20~70 m;当生产压差为2~8 MPa,启动压力梯度为0.03 MPa/m时,xy平面极限动用半径为70~200 m。

3.2 yz平面极限动用半径

根据yz平面上压力梯度分布,可确定不同压力

传播范围内的最小压力梯度。由图6可见,当生产压差为2 MPa,启动压力梯度为0.03~0.1 MPa/m时,yz平面极限动用半径为5~12 m。当生产压差为2~8 MPa,启动压力梯度为0.03 MPa/m时,yz平面极限动用半径为12~22.5 m。

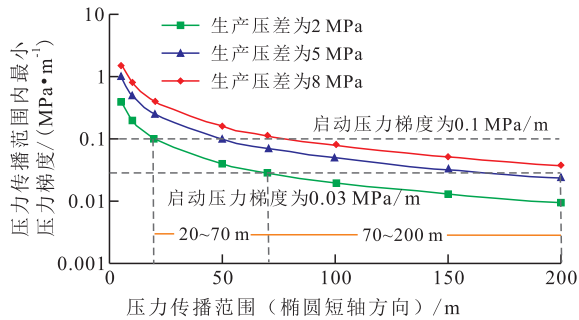


图5 xy平面不同压力传播范围内的最小压力梯度分布
Fig.5 Minimum pressure gradient at different pressure propagation ranges in xy plane

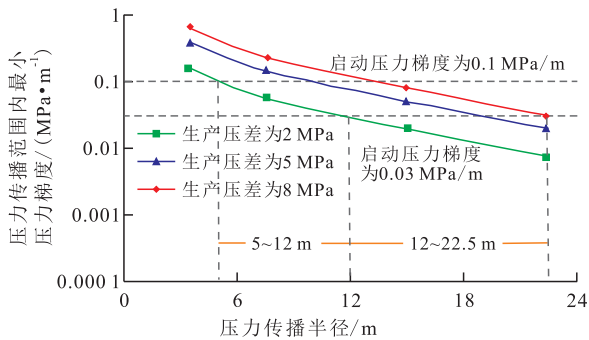


图6 yz平面不同压力传播范围内的最小压力梯度分布
Fig.6 Minimum pressure gradient at different pressure propagation ranges in yz plane

3.3 极限动用半径图版

由Oudeh油田天然能量开采的单井数值模拟预测结果显示^[12],油层厚度、流量和生产压差共同决定水平井能否实现有效开发。当启动压力梯度与最小压力梯度相等时,即可由式(10)和式(17)计算得到xy平面和yz平面上的极限动用半径,又由启动压力梯度与流量的关系,建立不同生产压差下水平井xy平面和yz平面上极限动用半径与流量关系图版(图7)。结果表明:①随着流量减小,流体流动阻力增大,xy平面和yz平面上水平井压力传播范围内的极限动用半径不断减小。对比xy平面和yz平面上的极限动用半径,二者在大小上存在明显差异。生产压差越大,xy平面和yz平面上的极限动用半径越大。若油藏原油粘度大,则采取降低原油粘度的措施以使原油启动压力梯度大幅降低;若油藏原油粘度小,则可增大生产压差,从而有利于极限动用半径的增加,扩大油藏的整体动用程度。②由于Oudeh油田主力油层平均厚度大,当yz平面极限动用半径小于储层厚度时,需要考虑部署立体井网。

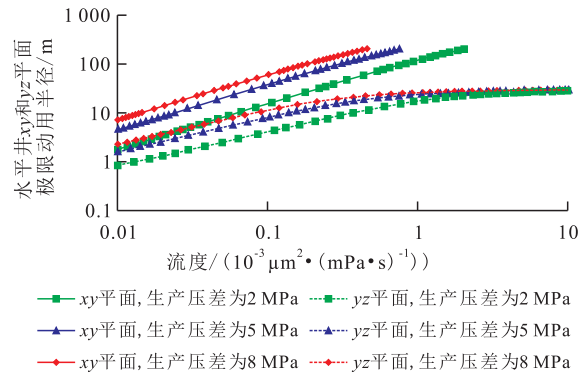


图7 不同生产压差下xy平面及yz平面极限动用半径与流量关系图版

Fig.7 Plate of limit drainage radius and mobility with various drawdown pressures in xy and yz plane

即若yz平面极限动用半径大于储层厚度,则部署井网时仅需考虑xy平面上的井距。当储层厚度较大时,若由开发参数确定水平井yz平面极限动用半径小于储层厚度,为了提高油藏的整体动用程度,则部署井网时可考虑在yz平面上进行多层井网部署;结合xy平面上的动用情况,进行储层内合理的立体井网部署。

4 结论

由水平井椭圆流动建模的拟三维方法,将渗流场划分出xy平面与yz平面2个既不相同而又连续的渗流阻力区,结合保角变换,建立xy平面和yz平面上水平井极限动用半径计算模型,能够准确得到天然能量开采中水平井在xy平面和yz平面上的压力分布特征及极限动用半径。

低渗透普通稠油油藏中存在启动压力梯度,降低了储层中流体流动能力,使得水平井天然能量开发中极限动用半径减小。由于在xy平面上流体呈线性流动,在yz平面上流体呈近似径向流动,水平井在xy平面上的极限动用半径明显大于yz平面上的极限动用半径。xy平面和yz平面的极限动用半径存在明显差异。yz平面极限动用半径与储层厚度的关系决定了开发是否采用立体井网部署。

符号解释:

$\Delta p/L$ ——启动压力梯度, MPa/m; Δp ——实验驱替压差, MPa; L ——岩心长度, m; K ——渗透率, μm^2 ; μ ——地面粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; l ——水平井井段半长, m; r_w ——油井半径, m; h ——油层厚度, m; d ——水平井距油层底部距离, m; ξ ——椭圆供给边界, m; Q_{xy} ——xy平面水平井产量, m^3/d ; p_{wi} ——供给边界压力, MPa; p_{wf} ——井底压力, MPa; G ——启动压力梯度, MPa/m; a ——椭圆长轴, m; b ——椭圆短轴,

m ; $\Phi_{x=0,y=b}$ ——椭圆供给边界(即椭圆短轴)上的势; C ——常数; Φ_y ——短轴 y 方向上 $0 < y < b$ 处的势; $p(0,y)$ ——沿椭圆短轴 y 方向的压力,MPa; $\Phi_{x=0,y=0}$ ——水平井井底的势; $\Delta\Phi_1$ ——椭圆供给边界与水平井井底的势差; Φ_w ——井壁处的势; Q_{yz} —— yz 平面水平井产量, m^3/d ; c_1 ——常数; Y ——沿椭圆短轴 y 方向上压力传播边界的位置, m ; Φ_1 ——点 $(Y, d-r_w)$ 的势; $\Delta\Phi_2$ ——井壁与点 $(Y, d-r_w)$ 的势差; $\Delta p(G)$ ——生产压差,MPa。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵益忠,程远方,刘钰川,等.启动压力梯度对低渗透油藏微观渗流及开发动态的影响[J].油气地质与采收率,2013,20(1):67-69,73.
Zhao Yizhong, Cheng Yuanfang, Liu Yuchuan, et al. Study on influence of start-up pressure gradient to micro-seepage in low permeability reservoirs and development trends [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(1): 67-69, 73.
- [3] 吕成远,王建,孙志刚.低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J].石油勘探与开发,2002,29(2):86-89.
Lu Chengyuan, Wang Jian, Sun Zhigang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 86-89.
- [4] 石立华,喻高明,袁芳政,等.海上稠油砂岩油藏启动压力梯度测定方法及应用——以秦皇岛32-6油田为例[J].油气地质与采收率,2014,21(3):82-85.
Shi Lihua, Yu Gaoming, Yuan Fangzheng, et al. Experimental method and its application on threshold pressure gradient for offshore sandstone in heavy oil reservoir: a case study of QHD32-6 oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21 (3): 82-85.
- [5] 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.
- [6] 李文权.苏53区块水平井整体开发技术[J].特种油气藏,2015,22(1):107-110.
Li Wenquan. Integrated development by horizontal well in Su53 Block [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(1): 107-110.
- [7] 计秉玉,赵宇,宋考平,等.低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J].石油实验地质,2015,37(2):129-133.
Ji Bingyu, Zhao Yu, Song Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [8] 陈民锋,赵晶,张贤松,等.低渗透稠油油藏水平井极限动用范围[J].中国石油大学学报:自然科学版,2014,28(2):103-108.
Chen Minfeng, Zhao Jing, Zhang Xiansong, et al. Limit drainage radius of horizontal wells in low-permeability heavy oil reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2014, 28(2): 103-108.
- [9] 赵春森.水平井与直井整体开发渗流理论研究[D].大庆:大庆石油学院,2001.
Zhao Chunsen. The study of integral development percolation theory with horizontal well and vertical well [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2001.
- [10] Joshi S D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells [R]. SPE 15375, 1988.
- [11] 陈民锋,李晓风,赵梦盼,等.启动压力影响下确定油藏有效动用半径[J].断块油气田,2013,20(4):462-465.
Chen Minfeng, Li Xiaofeng, Zhao Mengpan, et al. Determination of effective drainage radius for reservoirs considering threshold pressure gradient [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 462-465.
- [12] 宋传真,刘传喜,徐婷,等.低渗孔隙型碳酸盐岩稠油油藏开发对策——以叙利亚O油田为例[J].石油与天然气地质,2015,36(2):297-305.
Song Chuazhen, Liu Chuanxi, Xu Ting, et al. Development strategies for low-permeability carbonate heavy oil reservoirs: A case study from O oilfield in Syria [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36 (2): 297-305.

编辑 刘北羿