

复合型井组蒸汽辅助重力泄油开发三维势分布规律

孙启冀, 吕延防*, 李琳琳, 张艺晓

(东北石油大学 石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 采用单水平生产井与多直井复合型井组蒸汽辅助重力泄油开发的稠油渗流规律与传统井型开发的渗流规律不同, 水平生产井使原来直井间的注采关系由平行层面转换为立体区域。立体开发三维渗流数学模型的研究以势原理为基础, 将水平生产井渗流过程视为三维线汇, 建立以水平生产井水平射孔段两端为焦点的椭球形等势面方程; 将直井视为多个纵向叠加的平面点源, 建立以直井为中心线的圆柱形等势面方程; 利用势叠加原理将二者耦合, 推导得到复合型井组驱替过程中的渗流压力场和压力梯度场的数学模型。分析了立体开发的动用范围和重力发生泄流时的作用界限, 揭示了重力对蒸汽辅助重力泄油开发效果的影响以及重力对油层内压力场和压力梯度场的作用效果, 明确了重力会增大压力梯度场在油层内的作用范围和数值大小, 特别是在远井地带或由源汇产生的压力梯度较小的地方, 重力与驱替压力耦合后的压力梯度促使油层中被加热的流体向水平生产井发生泄流。

关键词: 复合型井组 蒸汽辅助重力泄油 渗流规律 势函数 重力驱

中图分类号: TE357.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2017)03-0071-07

Three-dimensional potential distribution of composite well group in SAGD process

Sun Qiji, Lü Yanfang, Li Linlin, Zhang Yixiao

(School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing City, Heilongjiang Province, 163318, China)

Abstract: There is a big difference in seepage law between the traditional well group and combined well group of single horizontal well and multi vertical wells for SAGD heavy oil recovery. The horizontal well can convert the injection-producer relation between the original vertical wells from a parallel plane one to a three-dimensional region one. Research on three-dimensional seepage mathematical model is based on potential theory. The seepage process of horizontal well was regarded as three-dimensional line sink and the ellipse potentiometric surface with the focus of the two ends of the perforation interval in the horizontal well was derived; the vertical wells were regarded as multiple planar point sources through longitudinal stacking and the cylindrical potentiometric surface with vertical well as the center line was derived; the mathematical model of the seepage pressure field and the pressure gradient field during the process of displacement in the composite well group was derived based on the coupling of the above results using potential superposition principle. Producing range of three-dimensional reservoir and the effect boundary of gravity discharge were determined. Effect of gravity on SAGD development effect, pressure field and pressure gradient field was analyzed. The results show that the gravity may enlarge pressure gradient field at far-wellbore zone or area with low pressure gradient produced by source and sink, which promotes the heated fluid in the oil reservoir to discharge to the horizontal wells.

Key words: composite well group; SAGD; seepage law; potential function; gravity drainage

收稿日期: 2017-01-05。

作者简介: 孙启冀(1986—), 男, 黑龙江大庆人, 讲师, 博士, 从事非常规油藏开发及渗流机理方面的研究。联系电话: 18345912655, E-mail: sunqiji422@126.com。

*通讯作者: 吕延防(1957—), 男, 吉林德惠人, 教授, 博导。联系电话: (0459)6503703, E-mail: lyf@nepu.edu.cn。

基金项目: 黑龙江省创新训练项目“热力—立体开发致密油基质逾渗演化行为描述实验研究”(201610220047), 东北石油大学青年基金项目“直井辅助SAGD开发热—驱—泄耦合渗流规律与数值模拟研究”(NEPUBS201504), 东北石油大学优秀科研人才培育基金“黑龙江省创新后备人才”(SCXHB201602)。

由1口水平生产井和多口注汽直井组成的复合型井组蒸汽辅助重力泄油立体开发技术,主要应用于稠油、特稠油和超稠油油藏。复合型井组的布井方式是在油藏底部新钻1口水平生产井,在水平生产井上方是一次开发时井组单元中的直井或斜井,分列于水平生产井的两侧,部分转为注汽井。此类井型转变的投资费用低,新钻井数量少,可有效利用老井,对低油价下常规蒸汽驱后续开发具有重要意义^[1-4]。而且在水平生产井的“连通”作用下,原来独立的井组单元被连接成为一个整体,对于开发中深层稠油油藏或热连通效果不好的区域,该类井组可以充分利用蒸汽的超覆作用扩大蒸汽波及区域,发挥重力和驱替压力对热流体泄流的协同作用^[5-6],增强流体间的换热程度,开发效果明显好于传统SAGD井组^[7-9]。该类井组特有的立体渗流规律对稠油立体开发具有重要意义,为此,笔者以三维条件下势叠加原理为基础,建立开发过程中油藏内势函数模型,直观展现复合井组等压面的变化规律和油藏内各点的启动压力梯度,分析油藏内各区域受源汇井和重力产生的影响,明确重力与驱替压力复合作用下的泄油机理,以期为高效SAGD的推广发展提供理论基础。

1 水平生产井三维势函数模型建立

常规水平生产井渗流规律的研究是先将三维问题简化为水平和竖直2个二维问题,再借助等值渗流阻力法叠加合成,这种方法由于简化了三维渗流的本质,所得的计算结果往往不能反映水平生产井实际的流动特性^[10]。目前复杂结构井型的渗流规律通用的研究方法是将水平生产井视为三维线汇(源),油藏流体以立体形式全方位流入(出)井内,特别是井筒端部流线呈半球形,形成以水平生产井两端点为焦点的旋转椭球形渗流等势面^[11]。

假设储层均质、各向同性、流体的粘度为定值,将水平生产井水平射孔段简化为线段AB,建立以水平生产井水平射孔段轴线为x轴、油层深度反方向为z轴正方向、x轴与z轴正交正方向为y轴的直角坐标系(图1)。水平射孔段长度为2c且为均匀线汇,则A点和B点坐标分别为(c,0,0)和(-c,0,0),取AB上的微线汇dx,则由dx引起的空间上任意点C(x₀,y₀,z₀)的势为

$$d\Phi_h = -\frac{dQ_h}{4\pi r} = -\frac{Q_h}{4\pi r \times 2c} dx \quad (1)$$

其中

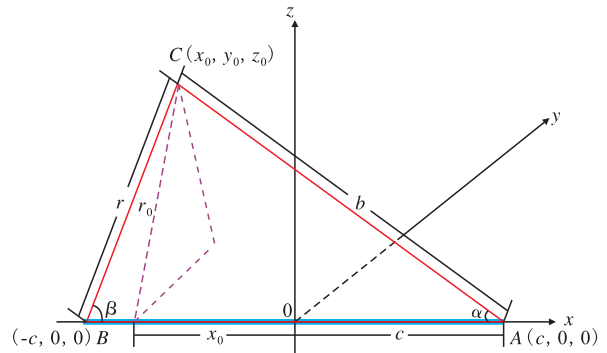


图1 油藏中水平生产井水平射孔段简化模型

Fig.1 Simplified model of perforation interval in the horizontal well of oil reservoir

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + r_0^2} \quad (2)$$

$$r_0^2 = y_0^2 + z_0^2 \quad (3)$$

沿水平生产井水平射孔段轴向进行积分,求得AB线汇在空间上任意点的势为

$$\Phi_h = -\frac{Q_h}{4\pi \times 2c} \int_{-c}^c \frac{1}{r} dx = \frac{Q_h}{4\pi L_h} \ln F + C_1 \quad (4)$$

其中

$$F = \frac{\sqrt{(c+x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2} - (c+x_0)}{\sqrt{(c-x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2} + (c-x_0)} \quad (5)$$

由图1中的几何关系可知,式(5)中 $\sqrt{(c+x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2} = r$, $\sqrt{(c-x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2} = b$, $r^2 - r_0^2 = (c+x_0)^2$,将这3个关系式代入式(5)可得

$$F = \frac{r - (c+x_0)}{b + (c-x_0)} = \frac{r_0}{b + (c-x_0)} \times \frac{r_0}{r + (c+x_0)} \quad (6)$$

根据图1中△ABC的三角函数关系可得

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} = \frac{\frac{r_0}{b}}{1 + \frac{c-x_0}{b}} = \frac{r_0}{b + (c-x_0)} \quad (7)$$

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{\sin \beta}{1 + \cos \beta} = \frac{\frac{r_0}{r}}{1 + \frac{c+x_0}{r}} = \frac{r_0}{r + (c+x_0)} \quad (8)$$

根据三角形半角定理,在△ABC中 $\tan \frac{\alpha}{2}$ 和 $\tan \frac{\beta}{2}$ 可分别表示为

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{r'}{S-r} \quad (9)$$

$$\tan \frac{\beta}{2} = \frac{r'}{S-b} \quad (10)$$

其中

$$r' = \sqrt{\frac{(S-r)(S-b)(S-2c)}{S}} \quad (11)$$

$$S = \frac{1}{2}(r+b+2c) \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(9)和式(10),再结合式(6)一式(8),式(5)进一步变形为

$$F = \tan \frac{\alpha}{2} \tan \frac{\beta}{2} = \frac{r'}{S-r} \times \frac{r'}{S-b} = \frac{S-2c}{S} \quad (13)$$

若令 $\eta = \frac{1}{2}(r+b)$, 式(13)可简化为

$$F = \frac{S-2c}{S} = \frac{\eta-c}{\eta+c} \quad (14)$$

将式(14)代入式(4),得到的水平生产井水平射孔段引起的空间上任意点的势为

$$\Phi_h = \frac{Q_h}{4\pi \times 2c} \times \ln \frac{\eta-c}{\eta+c} + C_1 \quad (15)$$

将式(15)中 $2c$ 替换为水平生产井水平射孔段长度时,得到的水平生产井水平射孔段在实际储层中产生的势为

$$\Phi_h = \frac{Q_h}{4\pi L_h} \times \ln \frac{\eta-c}{\eta+c} + C_1 \quad (16)$$

根据椭圆性质可知, C 点位于以水平生产井水平射孔段两 endpoints (A 点和 B 点)为焦点的椭圆上,则 C 点到水平射孔段两 endpoints 距离的算术平均值为定值,即等于椭圆的长半轴。所以水平生产井线汇的等势面为一簇以水平生产井水平射孔段两 endpoints 为焦点的旋转椭球面,只要空间中某一点与水平射孔段的相对位置确定,则势的大小也随即确定,与坐标轴的选取没有关系。由式(16)可以看出,地层中某一点由水平生产井水平射孔段引起的势只与井产量、水平射孔段长度及该点到水平射孔段的距离有关。若令式(16)中常数为油藏压力,即可得到某一油藏压力下的等势面。

2 直井与斜井三维势函数模型建立

直井射孔段的三维势可看作是斜井的一种特殊形式^[12-13]。建立以斜(直)井井排方向为 X 轴、油层深度反方向为 Z 轴、斜(直)井间水平方向为 Y 轴的直角坐标系(图2),假设在均质、各向同性无界地层中有一长度为 L_v 的斜(直)井射孔段,其井斜角为 γ ,方位角为 θ ,且单相原油在地层中为稳定渗流,斜(直)井为均匀流入的线汇,在射孔段上取微元段 ds ,则 ds 处的注汽量为

$$dQ_v = \frac{Q_v}{L_v} ds \quad (17)$$

根据势的定义, ds 在空间上任意点产生的势为

$$d\Phi_v = -\frac{dQ_v}{4\pi r_a} = -\frac{\Phi_v}{4\pi L_v} \times \frac{ds}{r_a} \quad (18)$$

斜(直)井射孔段上任意点 $R(X, Y, Z)$ 与空间上

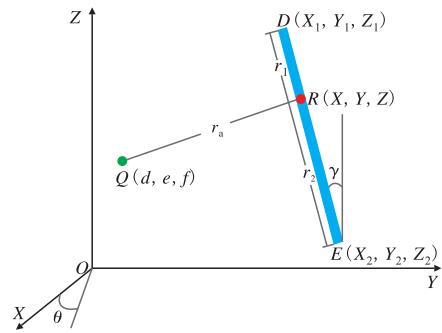


图2 油藏中斜(直)井射孔段简化模型

Fig.2 Simplified model of perforation interval in the inclined well or vertical well of oil reservoir

任意点 $Q(d, e, f)$ 之间的距离为

$$r_a = \sqrt{(X-d)^2 + (Y-e)^2 + (Z-f)^2} \quad (19)$$

根据 R 点与 E 点和 D 点的几何关系,式(19)可变形为

$$r_a = \sqrt{s^2 + 2M + N^2} \quad (20)$$

其中

$$M = \sin \gamma \cos \theta (X_1 - d) + \sin \gamma \sin \theta (Y_1 - e) - \cos \gamma (Z_1 - f) \quad (21)$$

$$N = (X_1 - d)^2 + (Y_1 - e)^2 + (Z_1 - f)^2 \quad (22)$$

将式(20)代入式(18),并对式(18)进行积分,得到斜(直)井射孔段引起的势为

$$\Phi_v = -\frac{Q_v}{4\pi L_v} \int_0^{L_v} \frac{ds}{r_a} = -\frac{Q_v}{4\pi L_v} \times \ln \frac{L_v + M + \sqrt{L_v^2 + 2ML_v + N}}{M + \sqrt{N}} + C_2 \quad (23)$$

对于直井, $\gamma = 0$, 则 M 和 N 可分别变形为

$$M = f - Z_1 \quad (24)$$

$$N = r_1^2 = (X_1 - d)^2 + (Y_1 - e)^2 + (Z_1 - f)^2 \quad (25)$$

对于直井,图2中的 D 点和 E 点的横、纵坐标值相同,即 $X_1 = X_2, Y_1 = Y_2$, 则

$$r_2^2 = (X_2 - d)^2 + (Y_2 - e)^2 + (Z_2 - f)^2 = (X_1 - d)^2 + (Y_1 - e)^2 + (Z_2 - f)^2 \quad (26)$$

对于直井, $L_v = Z_1 - Z_2$, 将式(24)、式(25)和 $L_v = Z_1 - Z_2$ 代入式(23),整理后式(23)变为

$$\Phi_v = -\frac{Q_v}{4\pi L_v} \ln \frac{f - Z_2 + r_2}{f - Z_1 + r_1} + C_2 \quad (27)$$

因为 r_1 与 r_2 的关系,可得

$$\frac{r_2 + (Z_2 - f)}{r_1 + (Z_1 - f)} = \frac{r_1 - (Z_1 - f)}{r_2 - (Z_2 - f)} \quad (28)$$

将式(28)代入式(27)可得

$$\Phi_v = -\frac{Q_v}{4\pi L_v} \ln \frac{r_1 + (Z_1 - f)}{r_2 + (Z_2 - f)} + C_2 \quad (29)$$

式(29)为直井射孔段在空间中的势分布公式,当 $\Phi_v=0$ 时,式(29)中的常数即为原始地层压力。

3 复合型井组中的势场叠加

复合型井组的渗流关系属于平面径向流与球形渗流的耦合,复合型井组单元实际模型如图3所示:水平生产井J的水平射孔段在储层中可视为水平线汇,产生的势场为椭球形,左右端点坐标分别为(30,0,0)和(70,0,0);注汽直井H的射孔段在储层中可视为纵向平面线源的叠加,上、下端点坐标分别为(50,35,30)和(50,35,10);注汽直井I的射孔段在储层中同样可视为纵向平面线源的叠加,上、下端点坐标分别为(50,-35,30)和(50,-35,10)。据此,式(16)中 η 和 c 分别为

$$\eta = \sqrt{(x-30)^2 + y^2 + z^2} + \sqrt{(x+70)^2 + y^2 + z^2} \quad (30)$$

$$c = |x_2| - |x_1| = 40 \quad (31)$$

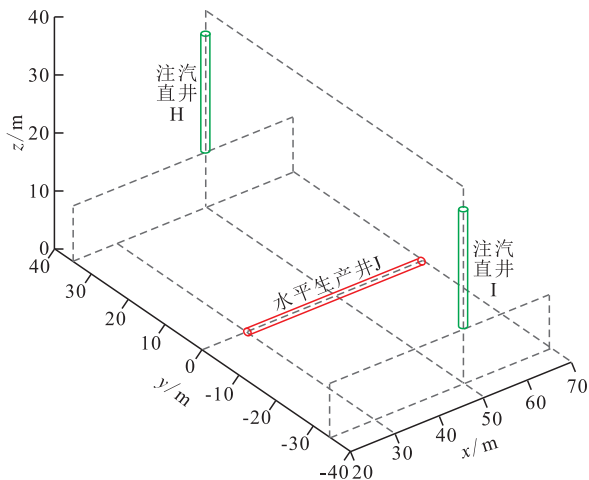


图3 复合型井组单元实际模型

Fig.3 Actual unit model of composite well group

复合型井组单元(两源一汇)的势函数为

$$\Phi(x, y, z) = \Phi_H + \Phi_I - \Phi_J + C_3 \quad (32)$$

利用式(29)计算 Φ_H 和 Φ_I 时,注汽直井H和I的 r_1 与 r_2 分别为

$$r_{1H} = \sqrt{(50-x)^2 + (35-y)^2 + (30-z)^2} \quad (33)$$

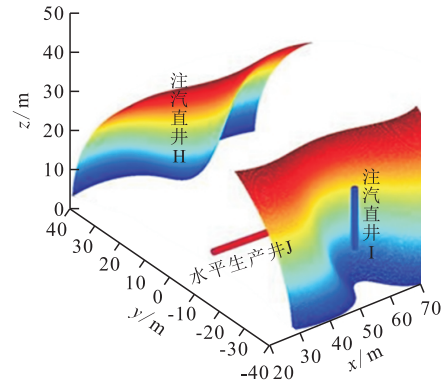
$$r_{2H} = \sqrt{(50-x)^2 + (35-y)^2 + (10-z)^2} \quad (34)$$

$$r_{1I} = \sqrt{(50-x)^2 + (-35-y)^2 + (30-z)^2} \quad (35)$$

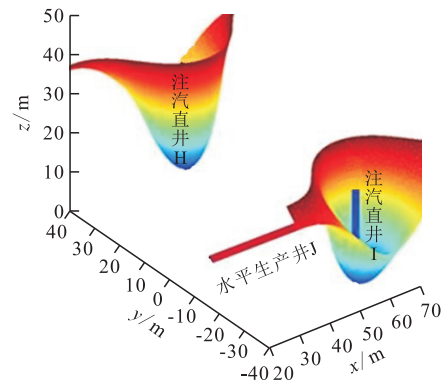
$$r_{2I} = \sqrt{(50-x)^2 + (-35-y)^2 + (10-z)^2} \quad (36)$$

正常生产状态下,复合型井组采注比为1.2~1.5,注汽量为120 t/d,产液量为250 t/d; C_3 值为实际地层压力,将这些生产参数代入式(16)和式(29)即

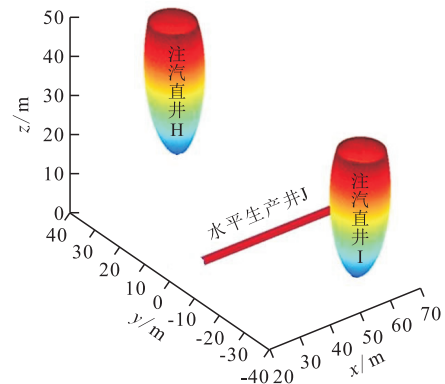
可得到不同生产时期复合型井组在油层中引起的等压面变化规律。由图4可以看出:在注汽生产初



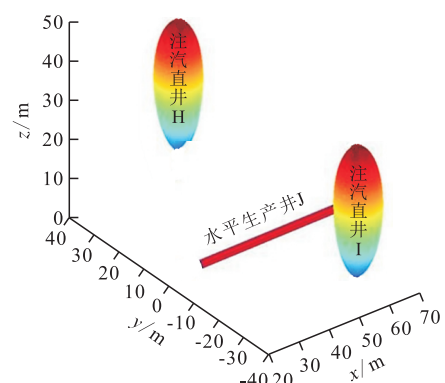
a—油层压力为2.0 MPa



b—油层压力为2.5 MPa



c—油层压力为3.0 MPa



d—油层压力为3.5 MPa

图4 不同地层压力下复合型井组等压面的变化

Fig.4 Change process of equipressure surface of composite well group under various reservoir pressures

期,即油层压力为3~3.5 MPa时,由于注汽压力远大于油层压力,使得蒸汽在射孔点位置以球面形式扩散,沿射孔点球面形式的等压面逐渐累积形成了椭圆形的等压面,随着注汽量的增加和水平生产井的抽吸,高压椭圆型蒸汽腔室逐渐扩大,油层内的平均压力降低;在生产中期,即油层压力为2.5~3 MPa时,受到油层底部水平生产井抽吸拖拽的影响,等压面逐渐向压力低的油层底部发生扩散;在生产后期,即油层压力为2~2.5 MPa时,随着生产的持续,油层压力大幅度降低,底部水平生产井的抽吸作用凸显,使得油层底部的压力迅速下降,致使油层中的流体向下发生泄流,在注汽直井的压力驱替作用下汇入底部水平生产井。

4 势场作用及重力作用界限分析

依据式(32)对势函数的各个方向求偏导后求和,即可得到油层空间内势场的压力梯度大小和方向^[14]。空间中任意点处的压力梯度表达式为

$$\lambda(x, y, z) = \frac{\mu}{K} \times \frac{\partial \Phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\mu}{K} \times \frac{\partial \Phi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\mu}{K} \times \frac{\partial \Phi}{\partial z} \mathbf{k} \quad (37)$$

利用复合型井组模型中2口注汽直井构成的剖面进行压力梯度场计算,可得到注汽直井截面压力梯度矢量云图。由图5可以看出,在靠近注汽直井射孔段下方,压力梯度方向直接指向水平生产井,水平生产井呈现出拖拽的作用;在靠近注汽直井射孔段顶端,压力梯度方向垂直于注汽直井,呈现水平驱替作用;在截面中部远离注汽直井间的区域,压力梯度方向与重力方向的夹角逐渐减小,在截面对称轴区域压力梯度方向与重力方向平行并逐渐变为竖直向下的方向,呈现向下泄流的状态。说明在复合型井组单元中流体的压力梯度的方向受水平生产井的影响发生了改变,在距离注汽直井10 m

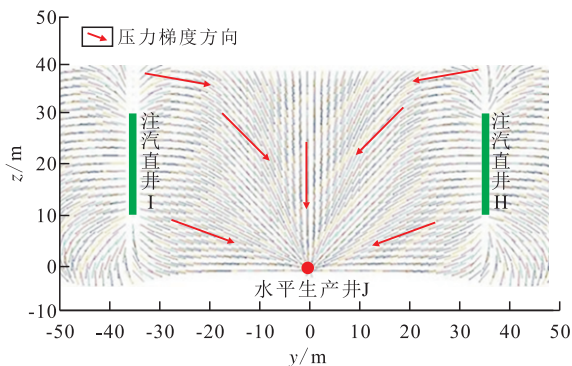


图5 注汽直井截面压力梯度矢量云图
Fig.5 Pressure gradient distribution between vertical steam injection wells

以外的区域,压力梯度方向明显指向水平生产井的方向,证明了水平生产井在复合型井组单元SAGD开发稠油过程中有利于蒸汽腔室的横向扩展,而蒸汽腔室的纵向扩展由蒸汽自身的超覆性所决定,所以蒸汽腔室的扩大有利于油层中压力驱替方向逐渐向水平生产井波及延伸。

在式(32)中可以引入带有重力项的达西定律,以分析重力对整个油层内势场的影响^[15]。重力引起的势场压力梯度为

$$\frac{\partial \Phi_g}{\partial z} = \frac{K}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) \quad (38)$$

油层内任意点由重力产生的液相压力为 $\rho g z$,因此由势函数与压力的关系可得复合型井组单元中考虑重力项作用的势函数为

$$\Phi = \Phi_H + \Phi_I - \Phi_J + \frac{K}{\mu} \rho g z + C_4 \quad (39)$$

由式(39)可以看出,重力对势场的意义等同于在油层内每一点的势再加上一个常量,其意义与 C_4 一致,故对式(39)求偏导便可得到考虑重力影响时油层内任意点的压力梯度,其表达式为

$$\lambda_g = \frac{\mu}{K} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\mu}{K} \frac{\partial \Phi}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\mu}{K} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} + \rho g \right) \mathbf{k} \quad (40)$$

由式(40)可得到注汽直井间截面油藏内压力梯度分布。由图6可以看出:有重力时压力梯度的作用范围大于无重力时的,重力的存在使得压力梯度整体增加。当压力梯度小于0.039 MPa/m时,重力的作用明显使得油层中的压力梯度在作用范围和数值上均大于无重力的,如在远离注汽直井的中间区域,即水平生产井上方靠近油层顶部区域,较大的压力梯度有助于流体向下泄流,同时也有助于蒸汽腔室的扩散,使得油层能在较短的时间内达到热连通的状态;而对于压力梯度为0.039~0.090 MPa/m的区域,如注汽直井周围和水平生产井周围,重力对压力梯度的影响较小。这是因为:在近

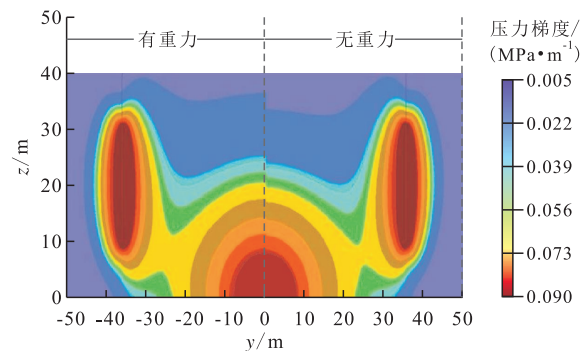


图6 重力对油层压力梯度分布的影响
Fig.6 Comparison diagram of pressure gradient distribution with and without gravity

井地带,源汇产生的驱替压力梯度较大,重力作用不明显;在远井地带或由源汇产生的压力梯度较小的区域,重力作用会使压力梯度增大,并改变压力梯度方向,使流体的渗流方向与 z 轴夹角变小,形成了稳定的泄流作用,扩大了注汽直井中间区域的流体动用范围。

稠油油藏流度与启动压力梯度的关系式为

$$\lambda = Ue^{-V \ln \frac{K}{\mu}} + C_5 \quad (41)$$

以新疆油田重32块为例,通过启动压力梯度实验求得 U 值为3.254, V 值为1.99, C_5 值为0.009,在渗透率和启动压力梯度已知的条件下,可以求得重力发生泄流时流体的粘度和该粘度下的温度(表1)。重32块稠油密度为 $997.4 \sim 1\,003 \text{ kg/m}^3$,地层渗透率为 $980 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $230 \text{ }^\circ\text{C}$ 时稠油粘度为 $14.99 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,所以根据式(40)中重力项,可计算得到该油藏条件下重力产生的启动压力梯度为 $0.009\,7 \sim 0.009\,8 \text{ MPa/m}$ 。由此可得出重32块稠油不同渗透率油层中重力泄流的温度界限为 $230 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因此,在稠油SAGD重力开发过程中,重力单独发生泄流,作用时要求的温度条件是极高的,尤其是渗透率低的区域,且过高的温度在现场实际生产中很难达到,这就需要具有较高的驱替压力或者较大的势能,才能促使稠油发生渗流。

表1 不同渗透率下重力泄油临界温度
Table1 Critical temperature of gravity drainage with different permeability

地层渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	原油粘度/ ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	启动压力梯度/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)	温度/ $^\circ\text{C}$
1 000	200	0.141 3	164
	100	0.042 3	170
	15	0.009 8	230
1 500	200	0.068 0	164
	100	0.023 9	170
	15	0.009 3	230
2 000	200	0.042 3	164
	100	0.017 4	170
	15	0.009 2	230

分析图6可知,对于较薄的油层或蒸汽腔室未完全扩展时,重力只能在小范围内发挥泄油作用,与驱替压力相比作用极小,所以在复合型井组SAGD开发稠油生产初期需要保持较高的注入温度和压力,这样才能保证井组底部水平生产井产液量增加。需要注意的是,当重力对稠油产生泄流作用时,油藏中的水由于密度大、粘度小,会先于稠油被动用,所以重力在SAGD开发过程中不仅仅是单纯

的泄油作用,而是起到改变热流体的流动方向的作用,使其向下部水平生产井发生泄流。在开发中期,流体在蒸汽腔室的边缘或顶部泄流而下,所以在远离注汽直井的蒸汽腔室边缘区域重力具有不断扩大蒸汽腔室的作用,并且由于稠油密度与水的密度接近,油水分层现象不明显,可以有效抑制生产井的含水率。开发后期油藏达到热连通,此时重力产生的势能促使流体向下运动,蒸汽超覆的挤压力和驱替压力也促使流体向压力较低的水平生产井流动,使重力与压力形成协同作用驱动流体流向水平生产井。

5 结论

结合三维条件下势的叠加原理,利用直井和水平生产井在空间中的势场分布形态,推导出复合型井组单元SAGD开发油藏的势函数和压力梯度场数学模型。应用数学模型直观地展现出立体开发过程中,油藏内部等压面变化趋势及流体质点压力梯度的方向和大小。建立了带有重力项的势函数模型,分析了复合型井组单元中重力的作用效果是使流体质点的压力梯度增大,运动方向与重力方向夹角变小,指向水平生产井,在远井地带或由源汇产生的压力梯度较小的地方,重力的作用会扩大压力梯度场,并明确了在实际井组单元中重力发挥泄流作用时的界限。

符号解释:

Φ_h ——水平生产井水平射孔段在空间中产生的势, m^2/s ; Q_h ——水平生产井产量, m^3/d ; r ——空间任意点 C 至水平生产井水平射孔段端点 B 的距离,即直角坐标系中 BC 的长度, m ; c ——水平生产井水平射孔段长度的 $1/2$, m ; (x, y, z) ——复合型井组单元中任意点的位置坐标; (x_0, y_0, z_0) ——直角坐标系中空间任意点 C 的位置坐标; r_0 ——空间任意点 C 至水平生产井水平射孔段的垂直距离, m ; L_h ——水平生产井水平射孔段实际长度, m ; C_1 ——水平生产井水平射孔段在实际储层中产生的势函数模型中的常数; b ——空间任意点 C 至水平生产井水平射孔段端点 A 的距离, m ; α —— $\triangle ABC$ 中 $\angle BAC$, $(^\circ)$; β —— $\triangle ABC$ 中 $\angle ABC$, $(^\circ)$; r' —— $\triangle ABC$ 内切圆半径, m ; S —— $\triangle ABC$ 周长的 $1/2$, m ; s ——注汽直井射孔段微元长度, m ; Φ_s ——斜(直)井射孔段在空间中产生的势, m^2/s ; Q_s ——斜(直)井注汽量, m^3/d ; L_s ——斜(直)井射孔段长度, m ; r_s ——空间任意点 Q 至斜(直)井射孔段的垂向距离, m ; (X, Y, Z) ——注汽直井射孔段上任意点 R 的位置坐标; (d, e, f) ——直角坐标系中空间任意点 Q 的位置坐标; (X_1, Y_1, Z_1) ——注汽直井射

孔段顶端 D 点的位置坐标; γ ——井斜角, $(^\circ)$; θ ——方位角, $(^\circ)$; C_2 ——注汽直井射孔段在实际储层中产生的势函数模型中的常数; r_1 ——注汽直井射孔段顶端 D 点与射孔段上任意点 R 的距离,m; r_2 ——注汽直井射孔段底端 E 点与射孔段上任意点 R 的距离,m; (X_2, Y_2, Z_2) ——注汽直井射孔段底端 E 点的位置坐标; Φ ——复合井组单元产生的势, m^2/s ; Φ_H ——注汽直井H射孔段在空间中产生的势, m^2/s ; Φ_I ——注汽直井I射孔段在空间中产生的势, m^2/s ; Φ_J ——水平生产井水平射孔段在空间中产生的势, m^2/s ; C_3 ——复合井组单元势函数中的常数; r_{1H} ——注汽直井H射孔段顶端 D 点与射孔段上任意点 R 的距离,m; r_{2H} ——注汽直井H射孔段底端 E 点与射孔段上任意点 R 的距离,m; r_{1I} ——注汽直井I射孔段顶端 D 点与射孔段上任意点 R 的距离,m; r_{2I} ——注汽直井I射孔段底端 E 点与射孔段上任意点 R 的距离,m; λ ——油层内任意点处的压力梯度矢量,MPa/m; μ ——地层流体粘度,mPa·s; K ——油藏中流体的绝对渗透率, μm^2 ; i, j, k ——直角坐标系中 x, y, z 方向上的单位矢量; Φ_g ——重力引起的势, m^2/s ; p ——地层压力,MPa; ρ ——地层流体密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m^2/s ; C_4 ——复合井组单元中考虑重力项作用的势函数中的常数; λ_g ——油层内任意点考虑重力影响时的压力梯度矢量,MPa/m; λ ——未考虑重力影响时的压力梯度,MPa/m; U, V, C_5 ——通过启动压力梯度实验求得的稠油油藏流量与启动压力梯度的关系式中的系数。

参考文献:

- [1] Nansuk You, Songhun Yoon, Chul Wee Lee. Steam chamber evolution during SAGD and ES-SAGD in thin layer oil sand reservoirs using a 2D scaled model[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2012, 18(7): 2 051-2 058.
- [2] 魏绍蕾, 程林松, 张辉登, 等. 夹层对加拿大麦凯河油砂区块双水平井蒸汽辅助重力泄油开发的影响[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 62-69.
Wei Shaolei, Cheng Linsong, Zhang Huideng, et al. Physical simulation of the interlayer effect on SAGD production by dual horizontal well in Mackay River oil sands block, Canada [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 62-69.
- [3] 杜殿发, 郑洋, 赵艳武, 等. 反九点联合井网水平井蒸汽驱产能公式[J]. 特种油气藏, 2016, 23(4): 90-92.
Du Dianfa, Zheng Yang, Zhao Yanwu, et al. Horizontal well productivity equation of steam flooding with inverted nine-spot combination well pattern [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(4): 90-92.
- [4] Ali Azad, Rick J Chalaturnyk. An improved SAGD analytical simulator: Circular steam chamber geometry [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 83(15): 27-37.
- [5] Keshavarz M, Okuno R, Babadagli T. Efficient oil displacement near the chamber edge in ES-SAGD [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 118(24): 99-113.
- [6] 李荣强, 吕爱民, 王建忠, 等. 低渗透油藏仿水平井注采井网产能[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 439-443.
Li Rongqiang, Lyu Aimin, Wang Jianzhong, et al. Productivity of the imitation horizontal well pattern in low permeability reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 439-443.
- [7] Ali Shafiei, Maurice B Dusseault. Geomechanics of thermal viscous oil production in sandstones [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 103(2): 121-139.
- [8] 刘如俊. 大庆长垣外围油田水平井初期产能预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(4): 74-77.
Liu Rujun. Prediction of the initial productivity for the horizontal wells in the peripheral oilfields of Daqing Placanticline [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(4): 74-77.
- [9] 张兆祥, 刘慧卿, 杨阳, 等. 稠油油藏蒸汽驱评价新方法[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 733-738.
Zhang Zhaoxiang, Liu Huiqing, Yang Yang, et al. A new evaluation method of steam flooding for heavy oil reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 733-738.
- [10] Davletbaev A Y, Kovaleva L A, Nasyrov N M, et al. Multi-stage hydraulic fracturing and radio-frequency electromagnetic radiation for heavy-oil production [J]. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, 2015, 15(9): 16-22.
- [11] 李文会, 刘鹏程, 吴永彬, 等. 稠油油藏泡沫油渗流数学模型的建立[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 108-114.
Li Wenhui, Liu Pengcheng, Wu Yongbin, et al. A mathematical model for foamy-oil flow in heavy oil reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 108-114.
- [12] Zhao Yangsheng, Feng Zijun, Feng Zengchao, et al. THM (Thermo-hydro-mechanical) coupled mathematical model of fractured media and numerical simulation of a 3D enhanced geothermal system at 573 K and buried depth 6 000~7 000 m [J]. Energy, 2015, 82(2): 193-205.
- [13] 林晶, 王新, 于洋飞, 等. 新疆油田 SAGD 鱼骨状水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(4): 7-11.
Lin Jing, Wang Xin, Yu Yangfei, et al. Drilling technology of the SAGD fishbone horizontal well in the Xinjiang Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 7-11.
- [14] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999: 68-102.
Kong Xiangyan. Advanced mechanics of fluids in porous media [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1999: 68-102.
- [15] 孙璐, 刘月田, 陈民锋, 等. 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[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 89-94.
Sun Lu, Liu Yuetian, Chen Minfeng, et al. Limit drainage radius of horizontal well in low-permeability common heavy oil reservoir: A case of Oudeh oilfield, Syria [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 89-94.

编辑 常迎梅