

基于响应面法的油田深部地层变形的数值试验研究

刘建军, 郑永香, 张伯虎, 纪佑军
(西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都, 610500)

摘要:在油田开发过程中,注水作业会打破原有地层的应力平衡状态,造成深部地层岩体变形甚至失稳破坏,并对油田开发效果造成影响。为了探寻影响深部地层变形失稳的主要因素,基于流固耦合理论,通过超拉丁方试验设计方法对油田注水涉及的不同因素进行了五因素三水平的实验分析,通过响应面法对实验得到的33组试验进行回归和因子分析,得到了各因子与地层变形的响应变量之间的关系。研究表明:地层注水变形过程中,注水压力对地层的应力场和变形场的影响都极大。储层的性质对于地层有效应力,初期较后期的影响更为显著;对于水平应变,初期的显著性较弱,后期逐渐提高;对于竖向沉降量,无较大影响。岩石力学性质的弹性模量对地层有效应力的影响较小,对水平应变和竖向沉降位移具有极大的显著性。

关键词:注水开发油田;地层变形;超拉丁方试验;响应面法;影响因素

中图分类号:TE341 **文献标识码:**A

Numerical study on deformation of deep formation in oilfield based on response surface method

Liu Jianjun, Zheng Yongxiang, Zhang Bohu and Ji Youjun

(School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: During the development of the oilfield, the water flooding disturbs the primary reservoir pressure, leads to the deformation of the deep formation in the oilfield and affects the extraction ratio of oil. In order to obtain the main effect parameters of the deformation, an experiment with 3 levels for 5 parameters was conducted by Hyper-Latin square experiment based on fluid-solid coupling theory. Then, the relationships among the deformation response and the different parameters were obtained after the regression and analysis by RSM method for 33 designed experiments. The results show that the injection pressure has significant influence on the effective stress and deformation. And the properties of the reservoirs affect more on the initial stage for the effective stress, however, the later period for the normal strain. The elastic modulus of the rock mechanics properties has little effect on the effective stress, and is a significant parameter for the normal strain and subsidence.

Key words: water flooding, stratum deformation, hyper-latin square experiment, response surface method, effect factor

注水开发是油田开发的重要方式之一。油田开发过程中,地层的原有压力平衡遭到破坏,注水可以为地层补充能量,保持地层的压力,随着时间增长,地层压力达到新的平衡^[1]。因此,地层注水是一个打破原有地层压力平衡,产生新的平衡的过程。根据有效应力原理,地层压力的改变会引起地层有效应

力的变化,地层的原始应力场受到干扰^[2],有效应力的变化会导致储层结构变化,反作用于渗流场,引发地层压力的变化,即流-固耦合作用。应力场和渗流场的变化将会导致地层发生变形和破坏,引起地层断层的活化与扩展。此外,向地层中注水,在岩层与水接触后,岩层自身的强度参数会发生变化,在原

收稿日期:2016-08-29。

第一作者简介:刘建军(1972—),男,博士,教授,博士生导师,石油地质工程方面研究。

基金项目:国家科技重大专项“页岩气渗流规律与气藏工程方法”(2017ZX05037001)。

始环境中保持稳定的岩层因为强度降低而发生失稳变形;同时有些膨胀性岩石,遇水体积发生膨胀,对周围围岩产生挤压,引起应力场变化,造成地层失稳变形。总之,地下水通过润滑、软化、冲刷运移、崩解、泥化、结合水强化、离子交换、溶解和氧化还原等物理化学作用改变岩体的矿物成分和微细观结构,使其体积膨胀,孔隙度增加,造成岩体内部损伤,微裂纹扩展形成宏观裂纹,从而弱化岩体的宏观力学性能^[3]。这些会导致油田套管的损坏,诱发地震的产生,导致巨大的经济损失。

向地层中注入流体,涉及到流体的流动和储层岩体的变形。Hu^[4]建立了注水过程中的油田预测模型,用于预测注水过程中储层的相关参数。Zhang^[5]研究了裂隙的渗流机理,分析了注入速度和流体通道对渗流的影响。Chen^[6]针对岩体裂隙,分析了裂隙在力学作用下的扩展机理。Shangguan^[7]研究发现,长期注水会导致储层的孔渗参数发生较大的改变。Orlic^[8]也发现长期的水的化学作用会严重弱化岩体的强度。但是地层压力和应力是时变参数,单独地针对某一特定条件下的研究不能够描述真正的地层情况^[9]。

地层中的流体与地层相互作用,渗流场、温度场、应力场和化学场相互作用,随着计算机技术的成熟和多场耦合理论的发展,地层注水的更多条件能够被考虑,研究结果也就更加全面和准确。王金生^[10]根据流—固耦合理论,采用不同的渗透系数、流体压力和岩石弹性模量,模拟了在地下水作用下岩层的渗流场与应力场之间的相互关系,研究注水对地层变形的作用。Yin^[11]基于有限元方法,建立了温度—应力—化学—渗流多场耦合方程,研究注入过程的相关参数变化。Altmann^[12]基于流—固耦合理论,建立了与孔隙压力相关的三维应力分量的描述方程,研究表明应力场的变化与该点在储层中所处的位置以及压力改变的持续时间有关。Ji^[13]根据流—固耦合理论,分析了地层注水的应力敏感性,拟合得到了流—固耦合条件下地层渗透率变化与应力变化之间的指数关系。姜涛^[14]考虑温度、流体和岩层的关系,研究了注水地层在热流固耦合作用下的变形情况。在考虑岩层应力与流体压力的同时,引入温度场,并建立相应的数学模型。

借助于多场耦合方法,Rutquist^[15]基于储层—盖层模型,分析了注入过程中的储层和盖层的应力变

化,并关注了液体运移对应力变化的影响,进而分析了注入过程中的拉伸破坏和剪切失效机理;此外,针对低渗透薄储层,研究了注入过程中的应力变化以及引起地层隆起的原因,他认为地层隆起与孔隙的扩大和相邻盖层压力的变化有关^[16]。断层和裂隙对储层的变形和破坏具有控制性作用,地层压力超过一定范围,引发断层活化和扩展^[17]。Shen^[18,19]和Kim^[20]等人的研究表明,岩体的各向异性、强度参数,储层的初始孔隙度、初始饱和度及液体注入条件对地层的变形和断层活动有重要的影响。

在考虑耦合作用中,涉及到多因素的相互作用,同因素以及不同因素之间的交互作用得到的结果是不同的,而且随因子的改变而发生变化。响应面法是一种关于研究多变量对目标造成影响的有效的实验设计方法^[21]。响应面法广泛用于多变量试验中,以研究各变量以及变量之间的相互作用多目标的影响^[21-24]。它通过统计学的方法进行实验设计,以实现以最少的试验次数来达到实验的目的,具有经济、省时和高效的特点^[24]。前人的研究多集中在单一因素的研究上。因此,将影响注水过程中地层变形的因素进行分类,采用响应面法进行实验设计与分析,可以在单变量的基础上,综合考虑各个变量之间的相互作用对地层变形的影响,实现对注水过程中诱发地层变形的多种因素综合分析。由此,本文采用超拉丁方试验设计方法,考虑生产条件(注水压力),不同储层条件(初始地层压力、渗透率、孔隙度),不同岩石性质(弹性模量)情况下的地层变形响应(有效应力、水平正应变和竖向沉降量)情况,由此分析不同时期的显著性因子,并且通过偏回归系数 t 检验确定各因子的主次顺序。本文基于响应面法,实现了对注水诱发地层变形的多因素作用情况研究。

1 实验方法

1.1 数值模型与变量选择

与浅部地层相比,深部地层具有地层压力大、地应力高、埋深大等特点,并且储层的孔隙率和渗透率偏低。因此,根据深部地层的特点,本文采用油田生产的五点井网法建立均质储层模型,将模型划分为 $13 \times 13 \times 5$ 个网格,储层上部埋深1 000 m,模型长、宽

均为 300 m, 储层厚度为 50 m, 注采井间距 200 m, 初始地应力为 30 MPa, 模型如图 1 所示。

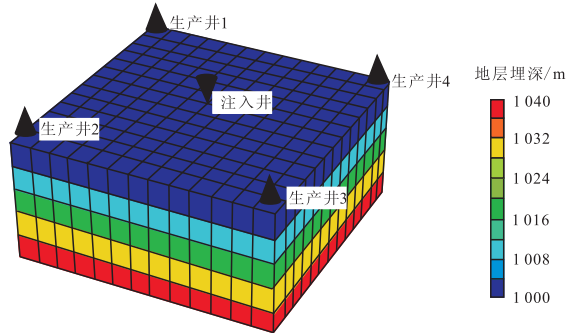


图1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

针对储层条件、生产条件和岩石性质三方面的因素, 本文选择了渗透率、孔隙度、初始地层压力、注水压力和弹性模量设为变量, 分析其变化对地层变化的影响。由于处于深部地层的储层渗透率一般较低, 因此, 将渗透率的参考值设置为 $20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。根据深部地层的特点, 将孔隙度、注水压力、初始地层压力和岩石弹性模量分别设置为 0.3、15 MPa、10 MPa 和 8.47 GPa。为研究各变量对地层变形的响应, 取每个变量的三个水平, 分别为该变量参考值的 0.8 倍、1 倍和 1.2 倍, 各变量的不同水平的取值情况如表 1 所示。

表1 各变量不同水平的取值

Table 1 Each parameter value of different levels

水平	变量				
	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	孔隙度 φ, f	注水压力 P_i/MPa	初始地层压力 P_0/MPa	岩石弹性 模量 E/GPa
0(0.8)	16	0.24	12	8	6.78
1(1.0)	20	0.30	15	10	8.47
2(1.2)	24	0.36	18	12	10.16

1.2 响应变量的确定

要考虑地层注水后的变形失稳响应, 应该确定地层变形时的有效应力, 以及地层正应变和竖向位

移量。并且由于注水初期会打破地应力原有平衡条件, 导致地层地应力的大的变动, 后期随着注水时间的延续, 逐渐达到新的平衡。因此应该考虑不同注水时间段内的影响效果。分别考虑 1 年后的短期作用效应和 6 年后的长期作用效应。因此, 本文确定了 1 年后和 6 年后的注水井井口周围 (7, 7, 1 网格处) 的有效应力, 水平正应变和竖向沉降量作为响应变量进行分析。

1.3 实验方案设计

5 因子 3 水平全部实施方案共有 $3^5=243$ 种方案, 因此为了能够减少试验次数并且又能达到实验目的, 本文采用超拉丁方设计来实现实验方案的部分实施, 实验总共设计 33 组实验方案, 实验方案如表 2 所示。

表2 试验设计方案

Table 2 Experiment design

编号	实验方案	编号	实验方案	编号	实验方案
1	0000010100	12	0101020000	23	0002000201
2	0102000001	13	0202000000	24	0202010101
3	0100020100	14	0002020201	25	0201020001
4	0001020101	15	0202010201	26	0001020000
5	0200000100	16	0000000002	27	0201000202
6	0202010001	17	0101020202	28	0100010102
7	0200020202	18	0201000200	29	0101010200
8	0000000100	19	0200010202	30	0202020102
9	0100010001	20	0001000201	31	0101000001
10	0002020102	21	0100010002	32	0101020100
11	0000010102	22	0102000002	33	0002010200

1.4 因子显著性的确定

用 $x_i (i=1, 2, \dots, k)$ 表示不同的因子, y 表示响应变量。通过正交二次回归方法, 可以得到以下回归

方程。

$$y = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j x_j + \sum_{j=1}^k a_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^k a_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

式中： a_0, a_j, a_{ij}, a_{ij} 为各回归项对应的回归系数。

拟合得到的方程需要用 R^2 来确定拟合方程的有效性。 R^2 在0到1之间取值,取值越趋向于1,说明公式拟合得越合理。

t 检验可用于判断某一因素对实验结果影响的显著性。通过二次回归方法,可以得到将各个因子转化为标准区间[-1,1]内各项因子所对应的回归系数、回归系数的标准差、 t 值和 P 值。 t 值为偏回归系数与其标准差之比。根据 t 值可以确定 P 值,在统计学意义上, P 值为结果可信程度的一个递减指标, P 值越大,该参数越不显著。 $P < 0.1$ 时,因子为显著性因子;反之, $P \geq 0.1$ 时,因子不显著。如果影响不显著,则可以将该项去掉以简化回归方程。对方程进行再次回归,可以得到新的回归方程。

可以通过 t 值的绝对值来确定各因子的显著性, t 值越大,该因子的显著性越强,按照因子的显著性水平对各因子进行排序。进而可以画出该响应情况下各变量的影响图,进行结果分析。

2 实验结果

经计算得到,响应为有效应力1年后的 R^2 为0.998 5,水平应变的 R^2 为0.975 6,竖向沉降的 R^2 为0.997 8;6年后的 R^2 为0.999 8,水平应变的 R^2 为0.979 1,竖向沉降的 R^2 为0.999 6,各 R^2 均接近于1,因此认为拟合得到的结果拟合较好,可以用于实验分析。

首先把1年后的有效应力作为响应进行实验。通过二次回归方法,可以得到将各个因子转化为[-1,1]的标准区间内各项因子所对应的回归系数、回归系数的标准差、 t 值和 P 值,得到的结果如表3所示。

由表3可以得到各因子的显著性,设定 $P < 0.1$ 时,因子为显著性因子,将 $P > 0.1$ 的非显著因子去除后重新回归,可以得到新的回归方程和对应的 t 值。同样的,可以得到响应分别为1年后水平应变,竖向沉降量和6年后有效应力,水平应变和竖向沉降量的实验 t 值。将1年后和6年后的不同响应情况下得到的结果分别汇总于表4和表5。

表3 回归方程与显著性评价参数

Table 3 Coefficients for regression equation and significance

因素	回归系数	标准差	t 值	P 值
常数	29 617.4	68.703 29	431.091	<0.000 01
$E(6.78 \times 10^6, 1.016 \times 10^7)$	23.373 13	21.631 16	1.080 53	0.301 14
$P_0(8 \times 10^3, 1.2 \times 10^4)$	1 177.089	25.117 87	46.862 6	<0.000 01
$k(16, 24)$	-225.960 4	21.804 82	-10.362 9	<0.000 01
$\varphi(0.24, 0.36)$	160.587 8	26.526 95	6.053 76	0.000 06
$P_w(1.2 \times 10^4, 1.8 \times 10^4)$	-1 522.954	20.764 36	-73.344 6	<0.000 01
EE	9.073 169	51.925 04	0.174 736	0.864 20
EP_0	42.280 2	32.100 86	1.317 1	0.212 40
Ek	-57.123 08	31.138 33	-1.834 49	0.091 48
$E\varphi$	22.463 65	29.966 81	0.749 618	0.467 93
EP_w	38.165 44	29.230 59	1.305 67	0.216 14
P_0P_0	57.465 04	59.087 62	0.972 539	0.349 98
P_0k	19.076 9	35.510 81	0.537 214	0.600 94
$P_0\varphi$	-3.693 091	37.533 44	-0.098 394 7	0.923 24
P_0P_w	96.445 44	33.461 93	2.882 24	0.013 77
kk	64.991 98	55.713 54	1.166 54	0.266 06
$k\varphi$	15.744 67	35.033	0.449 424	0.661 14
kP_w	-275.649 4	26.956	-10.225 9	<0.000 01
$\varphi\varphi$	12.922 98	45.157 43	0.286 176	0.779 62
φP_w	89.019 64	32.496 48	2.739 36	0.017 95
P_wP_w	-643.297 6	40.712 85	-15.800 8	<0.000 01

表4 1年后各响应变量下的 t 值

Table 4 t -ratio values for each response after 1 year

变量因子	有效应力	水平应变	竖向沉降
$E(6.78 \times 10^6, 1.016 \times 10^7)$	不显著	-8.541	5.441 8
EP_w	不显著	-7.109 1	11.772
EP_0	不显著	不显著	-6.556 1
Ek	-1.471 5	不显著	-2.289 8
$P_w(1.2 \times 10^4, 1.8 \times 10^4)$	-82.816	30.682	-62.691
P_wP_w	-18.371	6.725 4	-15.207
$P_0(8 \times 10^3, 1.2 \times 10^4)$	61.14	不显著	48.602
P_0P_w	5.375 5	不显著	不显著
$k(16, 24)$	-13.349	2.582 8	-9.349 3
kP_w	-12.162	不显著	-7.374 4
kk	不显著	不显著	4.432 4
$\varphi(0.24, 0.36)$	8.134 9	不显著	5.800 2
φP_w	5.092 9	不显著	不显著

表5 6年后各响应变量下的t值
Table 5 t-ratio values for each response after 6 years

变量因子	有效应力	水平应变	竖向沉降
$E(6.78 \times 10^6, 1.016 \times 10^7)$	不显著	-19.485	33.78
EE	不显著	不显著	-3.526 7
Ek	5.765 2	不显著	2.067
EP_0	-5.489 7	不显著	-22.268
EP_w	不显著	-5.122 3	31.057
$E\varphi$	不显著	不显著	-2.885 6
$k(16, 24)$	-30.315	-6.735 7	-16.335
kP_w	8.773 6	-6.596 6	3.700 9
$P_0(8 \times 10^3, 1.2 \times 10^4)$	270.43	不显著	112.91
P_0k	-1.995	不显著	-2.845
P_0P_0	-3.009 2	不显著	不显著
P_0P_w	-2.557 5	不显著	不显著
$P_0\varphi$	2.331 1	不显著	3.833 8
$P_w(1.2 \times 10^4, 1.8 \times 10^4)$	-447.49	35.195	-198.42
P_wP_w	12.154	-10.709	4.165 5
$\varphi(0.24, 0.36)$	10.248	6.092 9	4.510 7
φP_w	-6.481 6	4.902 2	-1.892 7

3 结果分析

3.1 各参数对有效应力的影响估计

可以通过t值的绝对值来确定各因子的显著性,按照因子的显著性水平进行排序,得到t值的台风图。为了研究主要显著性因子,得到对响应结果最显著的因子,按照t值排序取前10个显著性因子进行排序。

图2为1年后有效应力的因子主次图,由图2可知:在一次因素中,弹性模量对有效应力的响应不显著,其他4个因子具有显著性,由大到小分别为注水压力、初始地层压力、渗透率和孔隙度,其中注水压力和初始地层压力两个因子的显著性较其他因子更为显著。二次因子中注水压力的平方显著性较强。在交互因子中可以发现,受到注水压力的影响较大,也从侧面印证了控制注水压力的关键性。

图3为6年后的因子的主次排序图,因子的顺序未发生大的变化,注水压力和初始地层压力仍旧是最显著的影响因素,表明了注水压力对地层的变形有着绝对的控制性。

但是通过对比可以发现,6年后注水压力和初始地层压力两个因子影响在图中所占比例较1年后的结果增大,这两个因子的显著性得到了明显提高,而其他因子的显著性相对降低。这说明在初期的有效应力变化过程中,有效应力的值是以注水压力和初始地层压力控制为主,其他因素协同控制。随着注水时间增长,初始地层压力和地应力重新分布趋于稳定时,有效应力的响应值主要受到注水压力和地层应力的控制。

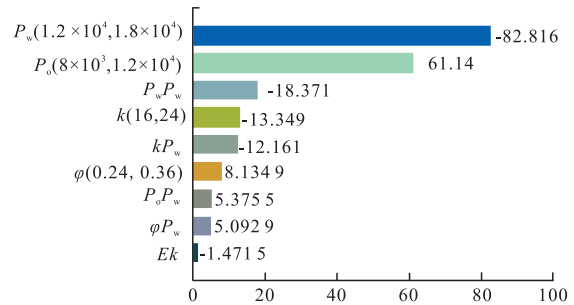


图2 注水1年后有效应力的影响因子主次顺序
Fig. 2 Tornado plot of effect estimate for effective stress after 1 year

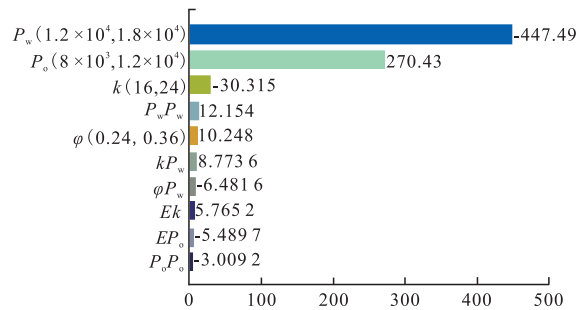


图3 注水6年后有效应力的影响因子主次顺序
Fig. 3 Tornado plot of effect estimate for effective stress after 6 years

3.2 各参数对水平正应变的影响估计

由图4可知,注水压力和弹性模量两个因子的作用最为显著,通过应力应变关系可知,注水压力对岩体的受力情况影响最大,弹性模量用以表征岩体对应力的响应情况,因此这两个单因素因子的作用要显著。两者间的交互作用也比较显著,印证了两者的显著性。此外,储层的渗透率条件对水平应变的影响也较为显著,这说明岩体渗透率所控制的流体渗流的程度对水平正应变具有一定的影响。

与注水初期1年时的结果相比,6年后的结果中因子主次顺序变化较小(图5)。但相比之下,第6年

时的显著因子增多,孔隙度的作用在6年时成为了显著因子,其他与注水压力的交互因子也变得显著。总体来看,注水稳定后的水平正应变是注水压力和变形模量主导,其他因子共同作用的结果。从图4、

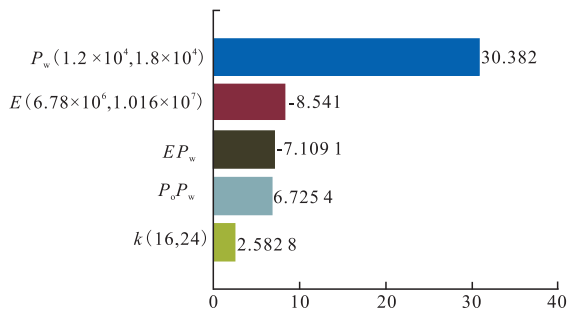


图4 注水1年后水平正应变的影响因子主次顺序
Fig. 4 Tornado plot of effect estimate for normal strain after 1 year

图5中可以看到,初始地层压力并没有出现,这说明初始地层压力对水平正应变的影响并不显著。与注水初期相比,注水稳定后显著因子增多,且显著性从初期的注水压力主导向着多因素协同作用变化。

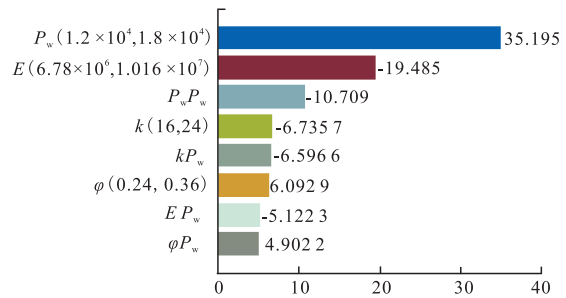


图5 注水6年后水平正应变的影响因子主次顺序
Fig. 5 Tornado plot of effect estimate for normal strain after 6 years

3.3 各参数对竖向沉降量的影响估计

从图6可以看到,注水初期对竖向沉降影响的一次因子中,弹性模量影响并不显著,其他四个单因素对竖向沉降的影响显著,按照主次顺序分别为注水压力、初始地层压力、渗透率和孔隙度。注水压力的二次因素中,显著的交互因素一般与注水压力有交互作用,体现了注水压力对竖向沉降的控制

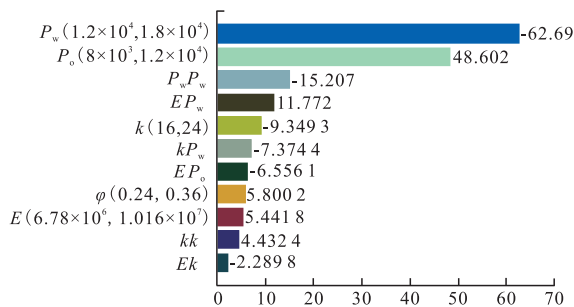


图6 注水1年后竖向沉降量的影响因子主次顺序
Fig. 6 Tornado plot of effect estimate for vertical subsidence after 1 year

作用。

通过对6年后的竖向沉降影响因素分析(图7),弹性模量的显著性排到了第三位,并且显著的交互作用主要与弹性模量的交互有关,说明后期的竖向沉降与弹性模量的值有显著关系。其他因素的因子的主次顺序未发生较大变化。通过图6、图7对比,可以看到注水稳定后的竖向沉降的各个因子中,显著性向注水压力集中,其他因子显著性较初期变小。

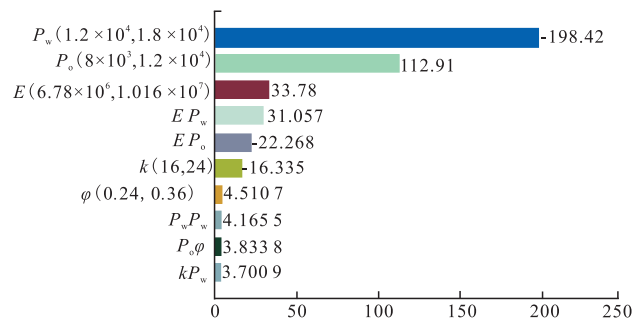


图7 注水6年后竖向沉降量的影响因子主次顺序
Fig. 7 Tornado plot of effect estimate for vertical subsidence after 6 years

3.4 不同因子类型对响应变量的影响

将试验涉及的5个因子分为三类:第一类是注水压力,这是可以人为控制的可操作因素;第二类是储层的基本属性,包括储层的初始地层压力、渗透率和孔隙度;第三类是地层岩体的力学强度,如弹性模量。

通过试验结果和因子主次顺序图可知,可控因素注水压力对地层起到绝对控制作用,对地层的有效应力、水平正应变和竖向沉降几个响应变量来讲都是最显著的因子。可以认为注水压力是地层变形中最重要的因子。

储层的性质对地层变形也有重要影响。对于有效应力,初期较后期的影响更为显著;对于水平应

变,注水初期储层性质的显著性较弱,但后期其显著性逐渐提高;对于竖向沉降量,储层性质在注水初期与稳定期的差别不大。

岩石力学性质对有效应力的变化影响较弱,但是有弹性模量与其他因素交互的因子具有显著性,可以认为这是流固耦合作用中岩石力学性质与渗流作用相互作用的结果。弹性模量对水平应变的影响极为显著,处于第二位。弹性模量对竖向沉降的初期影响不大,但到了注水稳定期后,弹性模量的影响就极为显著。

综上所述,地层注水变形过程中,注水压力对地层的应力场和变形场的影响都极大。储层基本性质对地层的变形响应有着一定的贡献,但基本稳定。岩石性质的弹性模量对应力有一定的影响,对应变和位移具有极大的显著性。

4 结论

基于油田注水过程中的流固耦合作用,通过超拉丁方试验设计方法对油田注水涉及的不同因素进行了五个因素,每个因素三个水平的实验分析,通过响应面法对实验得到的33组试验进行回归和因子分析,得到了各因子与地层变形的响应变量之间的关系,主要结论如下:

1) 在初期的有效应力变化过程中,有效应力的值是以注水压力和初始地层压力控制为主,其它因素协同控制。随着注水时间增长,初始地层压力和地应力重新分布趋于稳定时,有效应力的响应值主要受到注水压力和地层应力的控制。

2) 注水初期,注水压力和弹性模量两个因子的作用最为显著,岩体渗透率所控制的流体渗流的程度对水平正应变具有一定的影响。注水稳定后的水平正应变是注水压力和变形模量主导,渗透率和孔隙度对结果均有影响。与注水初期相比,注水稳定后显著因子增多,且显著性从初期的注水压力主导向着多因素协同作用变化。此外,初始地层压力对水平正应变的影响并不显著。

3) 注水初期对竖向沉降影响的主次顺序为注水压力、初始地层压力、渗透率和孔隙度,弹性模量影响并不显著。6年后注水稳定时,后期的竖向沉降与弹性模量的值有显著关系。随着注水时间的增长,可以看到注水稳定后的竖向沉降的各个因子中,

显著性向注水压力集中,其他因子显著性较初期变小。

4) 地层注水变形过程中,注水压力对地层的应力场和变形场的影响都极大。储层的性质对于有效应力,初期较后期的影响更为显著;对于水平应变,初期的显著性较弱,后期逐渐提高;对于竖向沉降量,无较大影响。岩石性质的弹性模量对应力有一定的影响,对应变和位移具有极大的显著性。

参考文献

- [1] 许华明,曲国胜,李行船,等.注水诱发地震的成因及影响因素探讨[J].西北地震学报,2008,30(3):221-226.
- [2] 仵彦卿.岩土水力学[M].北京:科学出版社,2009.
- [3] 刘业科.水岩作用下深部岩体的损伤演化与流变特性研究[D].中南大学,2012.
- [4] Hu S, Li Y, Wang Z, et al. A new approach of proration-injection allocation for water-flooding mature oilfields[J]. Petroleum, 2015, 1(1): 27-30.
- [5] Zhang Q, Ju Y, Gong W, et al. Numerical simulations of seepage flow in rough single rock fractures[J]. Petroleum, 2015, 1(3): 200-205.
- [6] Chen L, Liu J. Numerical analysis on the crack propagation and failure characteristics of rocks with double fissures under the uniaxial compression[J]. Petroleum, 2015, 1(4): 373-381.
- [7] Shanguan Y, Zhang Y, Xiong W. The effect of physical property change on the water flooding development in Changqing oilfield Jurassic low permeability reservoir[J]. Petroleum, 2015, 1(4): 300-306.
- [8] Orlic B, Heege J T, Wassing B. Assessing the integrity of fault- and top seals at CO₂ storage sites[J]. Energy Procedia, 2011, 4(1): 4 798-4 805.
- [9] Li Q, Xing H, Liu J, et al. A review on hydraulic fracturing of unconventional reservoir[J]. Petroleum, 2015, 1(1): 8-15.
- [10] 王金生.场地变形的多孔介质液固互动分析[D].河北联合大学,2012.
- [11] Yin S, Dusseault M B, Rothenburg L. Coupled THMC modeling of CO₂ injection by finite element methods[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 80(1): 53-60.
- [12] Altmann J B, Müller B I R, Müller T M, et al. Pore pressure stress coupling in 3D and consequences for reservoir stress states and fault reactivation[J]. Geothermics, 2014, 52(4): 195-205.
- [13] Youjun J, Jie W, Liuke H. Analysis on inflowing of the injecting Water in faulted formation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(6): 1-10.
- [14] 姜涛.基于热流固耦合注水地层及套管损坏分析[D].东北石油大学,2011.
- [15] Rutqvist J, Birkholzer J T, Tsang C. Coupled reservoir-geome-

- chanical analysis of the potential for tensile and shear failure associated with CO₂ injection in multilayered reservoir-caprock systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(2): 132-143.
- [16] Rutqvist J, Vasco D W, Myer L. Coupled reservoir-geomechanical analysis of CO₂ injection at In Salah, Algeria[J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 1 847-1 854.
- [17] Kaldi J, Daniel R, Tenthoirey E, et al. Containment of CO₂ in CCS: Role of caprocks and faults[J]. Energy Procedia, 2013, 37: 5 403-5 410.
- [18] Shen Y, Liu H, Wang H, et al. Wellbore instability induced by alternating water injection and well washing with an elastoplastic erosion model[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(3): 1 863-1 870.
- [19] Shen Y, Liu H, Wang H, et al. Initiation and propagation of wormhole in unconsolidated rock matrix induced by long-term water injection[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127: 93-100.
- [20] Kim J, Moridis G J. Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 76: 127-137.
- [21] Ghafari E, Costa H, Júlio E. RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66(5): 375-383.
- [22] Khayat K H, Ghezal A, Hadriche M S. Utility of statistical models in proportioning self-consolidating concrete[J]. Materials and Structures, 2000, 33(5): 338-344.
- [23] Anupam K, Dutta S, Bhattacharjee C, et al. Optimisation of adsorption efficiency for reactive red 198 removal from wastewater over TiO₂ using response surface methodology[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2011, 89(5): 1 274-1 280.
- [24] Li J, Liu Q, Ji Q Q, et al. Degradation of p-nitrophenol (PNP) in aqueous solution by Fe₀-PM-PS system through response surface methodology (RSM)[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2017, 200: 633-646.

(编辑 杨友胜)

(上接第15页)

联分析法的优势,有助于我们进行合理的储层分类评价。前者可以帮助我们选择出合理的、相对独立的评价参数;后者在求取各评价参数的权系数中发挥重要作用。最终得到储层评价的综合指标 REI,根据拐点法对储层进行划分归类。通过谱系聚类与灰色关联法的结合,避免了单因素在储层评价过程中的相互矛盾,同时实现对储层全面、客观、定量的评价,其结果更加可靠,更加准确。

2) 通过谱系聚类与灰色关联法的联合使用,将姬塬地区长6₁储层划分为四类,从 I 类储层到 IV 类储层,储层的综合指标值依次降低,储层越来越差。结合研究区的沉积相图可知,储层的物性与沉积环境密切相关,呈现明显的相控特点,主河道中央是形成优质储层的有利区域。

参考文献

- [1] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透油田储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
- [2] 刘吉余,彭志春,郭晓博.灰色关联分析法在储层评价中的应用——以大庆萨尔图油田北二区为例[J].油气地质与采收率,2005,12(2):13-15.
- [3] 吕红华,任明达,柳金诚.Q型主因子分析与聚类分析在柴达木盆地土沟油田新近系砂岩储层评价中的应用[J].北京大学学报,2006,42(6):740-745.
- [4] 杨德永,李超.储层评价中的大样本聚类方法[J].石油实验地质,1991,13(3):281-286.
- [5] 龙昱.灰色系统理论在地质研究中应用的探讨[J].地质科技情报,1988,17(1):108-109.
- [6] 陈欢庆,丁超,杜宜静,等.储层评价研究进展[J].地质科技情报,2015,34(5):66-74.
- [7] 宋子齐,王静,路向伟,等.特低渗透油气藏成岩储集相的定量评价方法[J].油气地质与采收率,2006,13(2):21-23.
- [8] 孙红志,刘吉余.储层综合定量评价方法研究[J].大庆石油地质与开发,2004,3(6):8-10.
- [9] 李超.白豹油田长8储层评价及建产有利区筛选[D].西安:长安大学,2011.
- [10] 赵加凡,陈小宏,张勤.灰色关联分析在储层评价中的应用[J].勘探地球物理进展,2003,26(4):282-286.
- [11] 宋土顺,刘立,于森,等.灰色系统理论关联分析法在储层评价中的应用[J].断块油气田,2012,16(6):714-717.
- [12] 谭河清,彭存仓,武国华,等.灰色聚类分析在孤东地区油气勘探中的应用[J].石油与天然气地质,2003,24(1):97-101.

(编辑 杨友胜)