

低渗透应力敏感性油藏的合理开发

汤勇,刘琦

(西南石油大学石油与天然气工程学院,四川成都610000)

摘要:针对低渗透油藏开发效果难以达到预期的现象,通过采用变流体压力应力敏感实验方法,保持围压不变对某低渗透油藏的岩心在不同流体压力下的渗透率进行测试。研究表明:随着流体压力的减小,岩心渗透率逐渐降低,但减小幅度趋于平缓;岩石渗透率越低,应力敏感性越强,流体压力恢复后,岩心渗透率并不能恢复到原来水平,其原因是低渗透岩石应力敏感性是不可逆的。利用径向渗流理论,结合应力敏感性对渗透率的影响,建立新的油井产能方程,计算出地层压力变化对单井产能的影响。在保持生产压差为4 MPa不变的前提下,地层压力下降5 MPa,单井的产能降低10%~30%,储层渗透率越低,降幅越大。为使低渗透应力敏感性油藏得到合理高效的开发,储层在进行压裂、射孔和作业过程中需注意油层保护;在开采过程中需观察井底流压的变化,维持合理的生产压差;当油井产油量明显下降后,适时对近井地带储层进行酸化,增大近井地带的渗透率。

关键词:低渗透储层 应力敏感性 不可逆 单井产油量 生产压差

中图分类号:TE348

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)04-0105-05

Rational exploitation in low permeability oil reservoir with stress sensitivity

Tang Yong, Liu Qi

(College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610000, China)

Abstract: It is difficult to achieve a desired development effect in low permeability oil reservoir. Experiment of stress sensitivity at various fluid pressures was made to test the permeability of the cores in a certain low permeability oil reservoir under the condition of constant confining pressure. The results show that the core permeability decreases gradually with the decrease of the fluid pressure, and then tends to be gently. The lower the permeability of the rock, the stronger the stress sensitivity, and the core permeability cannot recover to the former after the fluid pressure recovers. Its reason is that the stress sensitivity of the low permeability rock is irreversible. Based on radial flow theory, a new productivity equation for oil well was derived considering the effect of stress sensitive on the permeability. The effect of formation pressure on single well productivity was calculated. Under the constant producing differential pressure of 4 MPa, the single well productivity is reduced by 10% to 30% when the formation pressure drops by 5 MPa. The lower the reservoir permeability, the larger the fall. In order to develop the low permeability reservoir with stress sensitivity reasonably and efficiently, reservoir protection should be made in the process of fracturing, perforation and operation. In the process of production, the change of bottom-hole pressure should be observed and reasonable producing differential pressure should be maintained in the production. After the oil well production declines obviously, real-time acidizing should be made to increase the permeability of the near wellbore area.

Key words: low permeability oil reservoir; stress sensitivity; irreversible characteristics; single-well oil production; producing differential pressure

低渗透储层开发过程中如何提高单井产能是油气开发难题。单井产能主要由岩石渗透率决定,

而低渗透储层除本身孔隙结构、岩石骨架特征导致渗透率低之外,在开发过程中岩石会表现出明显的

收稿日期:2017-04-10。

作者简介:汤勇(1975—),男,四川广安人,教授,博导,从事油气田开发研究。联系电话:13084410503, E-mail: tangyong2004@126.com。

应力敏感性,随着油藏内压力下降,微小孔道闭合,渗透率进一步下降^[1],导致开发难度增大。随着近年来石油开发项目的不断增多,中外学者增加了对储层应力敏感性研究的关注度,但研究结果差异较大。为此,笔者通过变流体压力应力敏感性实验,研究低渗透储层岩石在不同流体压力下渗透率的变化规律。通过建立新的油井产能方程,计算流体压力变化对单井产能^[2]的影响幅度,提出低渗透储层开采过程中的注意事项,改变以往开发中单纯依靠扩大生产压差来提高单井产能的错误认识,以期对低渗透油藏合理高效开发提供理论依据。

1 应力敏感性实验

应力敏感性是指随着有效应力的改变,岩心渗透率等物性参数也发生改变的性质。在常规的条件下,一旦有效应力发生变化,岩心渗透率与原始地层条件下的渗透率测定值之间将存在较大差异。在实际地层中,有效应力指的是上覆岩石压力与孔隙内流体压力的差值,在进行室内岩心实验时,有效应力则为岩石围压与孔隙内流体压力之差。

1.1 实验装置

为了更加精准地模拟地下岩石应力的改变情况,实验中保持岩石围压不变,通过改变岩石流体压力,对不同渗透率的4块岩心样品进行应力敏感性实验^[3]。实验中围压稳定在20 MPa,实验温度为20 ℃。实验装置(图1)主要包括:①高压气瓶,主要用于为岩心提供围压,模拟岩心上覆压力,提供压力最大值为30 MPa;②恒压恒速泵,主要用于向岩心提供流体压力,可调节流体的流速和流量,施加岩心的进口、出口压力;③岩心夹持器,用于固定岩心,提供密封环境,最大承受压力为30 MPa;④回压阀,用于控制出口流体速度和压力;⑤皂模流量计,

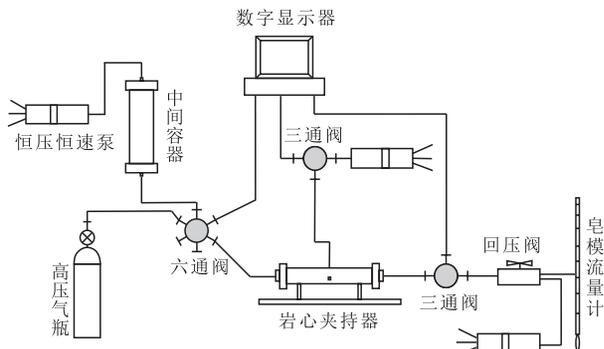


图1 应力敏感性实验设备及流程

Fig.1 Experimental equipments and flow chart of stress sensitivity test

用于计量流体体积,观测流量;⑥数字显示器,直接显示恒压恒速泵提供的压力,保证实验数据的精确性。

1.2 实验材料

实验岩心 实验材料主要由4块不同渗透率的人造岩心组成(表1),通过不同粒径的石英砂按照一定的配比,通过填砂管进行填砂、加水、搅拌和压实,制备了相同直径、不同长度、不同孔隙度、不同渗透率的岩心。

表1 实验岩心的基本参数
Table1 Basic parameters of experimental cores

岩心编号	直径/cm	长度/cm	孔隙度,%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
1	2.5	4.8	15.1	0.15
2	2.5	6.2	13.5	0.12
3	2.5	4.5	15.8	2.32
4	2.5	4.2	14.2	0.28

注入溶剂 由于研究区地层原油粘度为5 mPa·s,属于轻质油,实验主要采用煤油作为注入溶剂,研究低渗透油藏应力敏感性。

1.3 实验步骤

实验步骤主要包括:①按图1连接实验器材;②将实验岩心装入岩心夹持器中,密封合格后根据岩心渗透性对岩心施加一定的启动压力,随后对进口压力、回压、围压逐渐提升至设计压力;③保持围压不变,回压及进口压力逐渐减小,同时保持进口、出口压差不变,测量其岩心渗透率;④重复步骤③,直至降压结束;⑤围压继续保持稳定不变,回压及进口压力逐渐增大,同时保持岩心进口、出口压差不变,测量岩心渗透率;⑥重复步骤⑤,当进口压力升到实验初始值时测量结束。

1.4 实验结果分析

从不同有效应力下各岩心渗透率变化规律(图2)可知:随着进口压力的减小,有效应力增加,渗透率逐渐减小,减小幅度逐渐趋于平缓^[4];进口压力增大至初始水平后,渗透率不能恢复到初始水平,岩心的渗透率越低,应力敏感性越强。例如1号岩心有效应力从4.5 MPa增加到6 MPa时,渗透率从 $0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 下降到 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,有效应力增大30%,渗透率下降近40%,但后期有效应力继续增大,渗透率减小幅度明显变小;岩心有效应力从6 MPa减小到4.5 MPa时,岩心渗透率恢复到 $0.11 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,并未恢复到初始水平。岩心渗透率变化的主要原因是随着有效应力的增加,岩心中闭合压力偏低的孔隙和喉道闭合^[5],进而降低了岩心渗透率。当有效应力重新恢复到初始水平时,岩心渗透

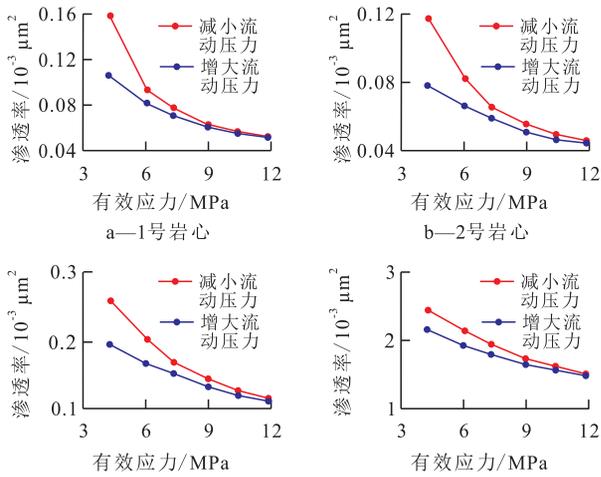


图2 不同有效应力下各岩心渗透率的变化规律
Fig.2 Variation of permeability of various cores with effective stress

率却不能完全恢复,说明了岩心本身的孔隙结构具有较大的可塑性,一旦破坏了原有的渗流通道,将会很难恢复,具有不可逆性。

2 应力敏感性对单井产能的影响

流体在多孔介质渗流时,经过喉道都会造成较大的压力损失。对于低渗透油藏,喉道异常细小,渗流阻力^[6]更大,在流体流动过程中压力下降较为明显,储层所表现出的应力敏感性伤害更加突出。低渗透油藏开发过程中会出现油藏压力的降低,储层应力敏感性所造成的渗透率降低是不可避免的,而渗透率损失对单井产能影响较大。

根据变流体压力应力敏感性实验^[7]结果得出,岩石渗透率和有效应力的关系式为

$$\frac{K}{K_i} = a \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_i} \right)^{-c} \quad (1)$$

将式(1)与径向渗流理论相结合,推导出产量公式为

$$\frac{q}{2\pi h} \ln \frac{r_e}{r_w} = \frac{a \Delta p_i K_i}{\mu(1-c)} (p_{uw} - p_{ue}) \quad (2)$$

其中

$$p_{uw} = \left(\frac{p_u - p_w}{\Delta p_i} \right)^{1-c} \quad (3)$$

$$p_{ue} = \left(\frac{p_u - p_e}{\Delta p_i} \right)^{1-c} \quad (4)$$

由于地层压力下降而引起的低渗透储层应力敏感性对单井产能影响的关系式为

$$\frac{q}{q_i} = \frac{p_{uw} - p_{ue}}{p_{wi} - p_{we}} \quad (5)$$

当生产压差稳定在4 MPa,地层压力逐渐降低时,由于低渗透储层应力敏感性所引起的单井产能变化可由式(5)所得。从图(3)中可以看出:地层压力降幅增大,单井产能下降越明显,储层岩石所表现出的应力敏感性对单井产能的影响越严重。当地层压力下降幅度为5 MPa时,单井产能降低幅度可达10%~30%;同时,储层渗透率越低,产能下降越明显,尤其是当渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,应力敏感性所造成的单井产能降低幅度将超过20%。

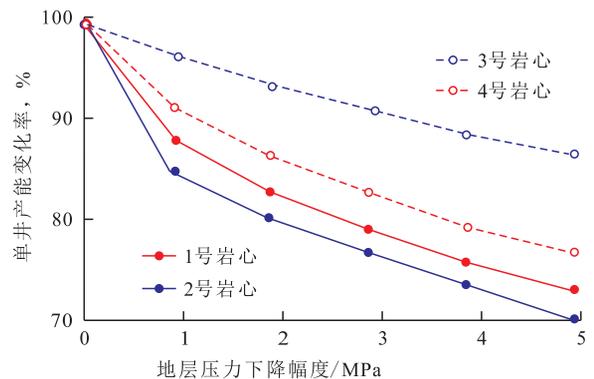


图3 不同岩心应力敏感性对单井产能的影响
Fig.3 Influence of reservoir stress sensitivity on single well productivity

3 合理开采方式

由于低渗透油藏自身储层条件较差,孔隙度低、渗透率低、喉道细小^[8],使得低渗透油藏开采难度大,前期需要压裂改善储层,投入资金多,后期单井产能变低、效益变差。如果开采方式不合理,将会造成储层伤害,难以达到预期的开发效果。若合理开采低渗透油藏,需做好油层保护,减少不必要的储层伤害;其次,在生产过程中选择合理的生产压差,控制井底流压,降低应力敏感性对储层渗透率的影响;最后,在生产中、后期适时改造近井地带储层,增大近井地带的渗透率,从而提高油井的产能。

3.1 油层保护

油田在勘探开发的各个环节均可造成低渗透储层的损害,包括压裂、射孔、作业等,储层不能适应情况变化,就会导致油层渗透率降低,造成储层损害。由于低渗透储层自身渗透能力差,任何轻微的污染伤害都将导致产能的大幅度降低,因此,低渗透储层的油层保护尤为重要。

压裂 对低渗透储层进行压裂时,会增大储层渗透率,增强导流能力。但压裂过程中如果压裂液性能不达标、压裂工艺不当,都将对储层造成永久

性损害。因此,在低渗透储层压裂过程中,要选用性能稳定的压裂液,适当添加粘土稳定剂;压裂施工完成后,要及时对储层彻底返排压裂液。

射孔 在射孔过程中造成油层伤害的主要原因包括射孔弹射孔后的碎屑物堵塞孔眼和射孔液、滤液伤害油层。针对油层可能在射孔过程中所受到的伤害而进行储层保护措施主要包括:①选用穿透能力强的聚能射孔弹,防止产生碎屑物;②使用优质射孔液,保证射孔液与地层水具备良好的配伍性,防止孔眼堵塞,防止与地层水发生反应而导致储层伤害;③利用负压射孔新型技术,对近井地带污染物充分返排,减小储层伤害。

作业 对于井下作业,会因进井液的污染,导致储层渗透率降低。因此,在井下作业过程中,需保证井下所有工具和洗井液的清洁,切实保证洗井液水质达到要求,保证洗井液与地层水良好的配伍性,减小洗井液对储层的伤害。

3.2 合理生产压差的确定

在低渗透油藏中,流体流动既要克服启动压力梯度^[9]的影响,又要尽量降低应力敏感性对储层渗透率的伤害,因此在油藏开采过程中合理的生产压差对单井产能尤为关键。

根据岩石变流体压力应力敏感性实验,保证围压和进口压力不变,通过调整回压阀控制出口压力,统计不同生产压差下岩心的流量,得出不同生产压差下岩心的采油指数(图4)。研究结果表明:初始阶段,随着生产压差的递增,采油指数呈上升趋势,但达到一定高度后,采油指数反而随着生产压差的继续增大而递减。图4中拐点即为合理的生产压差。拐点后的采油指数下降最直接原因是低渗透储层岩石发生塑性变形,致使储层渗透率下降,渗流能力^[10]减弱。不同渗透率的岩心合理的生产压差虽有不同,但差异不大,基本为4 MPa左右。

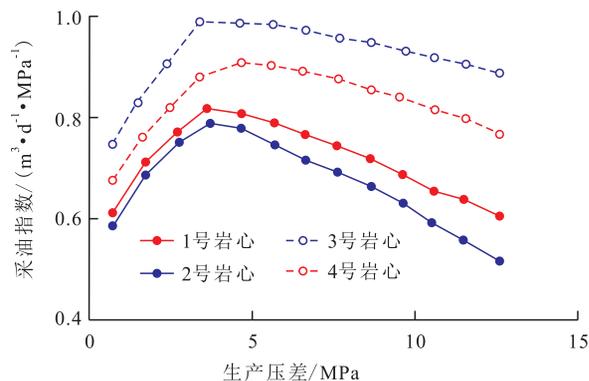


图4 不同生产压差下的各岩心采油指数变化规律

Fig.4 Variation of oil production index of various cores in different producing differential pressures

因此,为提高油井的生产效率,在实际生产过程中实时监测动液面的变化,调整抽油机的工作制度,尽量保持井底流压在合理范围内。

3.3 适时改造近井地带储层

在油田正常开采过程中,流体从供给边缘流向生产井,随着流体压力的逐渐下降,岩石渗透率降幅逐渐增大。流体在渗流过程中不可避免地出现压力损失,在油井井底附近压降最大,井底附近地层压力敏感性最强,储层渗透率伤害也最为严重。由于低渗透储层应力敏感性是不可逆的,即使地层压力能恢复到原始压力^[11],渗透率也很难恢复到初始水平。一旦近井地带的渗透率下降明显^[12],单井产能将会明显下降,在实际生产中继续放大生产压差反而会导致单井产能的进一步降低。低渗透油藏生产中、后期,可通过氮气泡沫酸化返排技术和酸压等适时改造近井地带储层的渗透率,提高油井的产液能力。

4 结论

通过变流体压力应力敏感性实验研究发现,随着流体压力的减小,渗透率逐渐降低,但减小幅度趋于平缓;岩石渗透率越低,应力敏感性越明显,流体压力恢复后,渗透率不能恢复到初始水平,低渗透储层应力敏感性是不可逆的;地层压力降幅增大,单井产能下降越明显,储层岩石所表现出的应力敏感性对单井产能的影响越严重。当地层压力下降5 MPa时,单井产能降低幅度可达10%~30%,尤其是当渗透率小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,应力敏感造成的单井产能降低幅度将超过20%;合理高效开发低渗透油藏时,需注意对压裂、射孔、作业过程中的油层保护,在生产过程中保持4 MPa的合理生产压差,低渗透油藏在生产中、后期时需对近井地带储层进行改造。

符号解释:

K —— 岩心测试渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_i —— 岩心原始地层压力下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; a, c —— 实验系数; Δp —— 有效压差, MPa; Δp_i —— 初始有效压差, MPa; q —— 井口流量, cm^3/s ; h —— 地层厚度, cm; r_e —— 供给边缘半径, cm; r_w —— 井筒半径, cm; μ —— 流体粘度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; p_{uw} —— 出口有效压差系数; p_{uc} —— 进口有效压差系数; p_a —— 上覆岩石压力, MPa; p_w —— 出口压力, MPa; p_e —— 进口压力, MPa; q_i —— 原始地层压力下的产油量, cm^3/s ; p_{awi} —— 原始地层压力下的出口有效压差系数; p_{uwc} —— 原始地层压力下的

的进口有效压差系数。

参考文献:

- [1] 张琬.储层应力敏感对异常高压低孔低渗裂缝性气藏开发的影响[J].中国化工贸易,2015,7(31):357.
Zhang Wan.Effect of stress sensitivity on the development of overpressure fractured gas reservoirs with low porosity and low permeability[J].China Chemical Trade,2015,7(31):357.
- [2] 徐新丽.含微裂缝低渗储层应力敏感性及其对产能影响[J].特种油气藏,2015,22(1):127-130.
Xu Xinli.Stress sensitivity of low-permeability reservoir containing micro-fracture and its influence on productivity[J].Special Oil & Gas Reservoirs,2015,22(1):127-130.
- [3] 郭肖,朱争,高涛,等.温度对低渗透储层应力敏感影响[J].大庆石油地质与开发,2015,34(4):82-87.
Guo Xiao,Zhu Zheng,Gao Tao,et al.Influences of the temperature on the stress-sensitivity in low permeability reservoirs[J].Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2015,34(4):82-87.
- [4] 窦晶晶,修乃岭,严玉忠,等.基于应力敏感常数的致密砂岩储层应力敏感性评价研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2015,17(4):10-12,20.
Dou Jingjing,Xiu Nailong,Yan Yuzhong,et al.Research on stress sensitivity evaluation experiments of tight sandstone reservoir based on stress sensitivity constant[J].Journal of Chongqing University of Science and Technology:Natural Science Edition,2015,17(4):10-12,20.
- [5] 高慎帅,李祥同,孙磊,等.低渗透储层应力敏感问题研究现状[J].内蒙古石油化工,2015,25(7):123-125.
Gao Shenshuai,Li Xiangtong,Sun Lei,et al.Status of stress sensitivity of low permeability reservoir[J].Inner Mongolia Petrochemical Industry,2015,25(7):123-125.
- [6] 张海勇,何顺利,栾国华,等.微裂缝超低渗储层的应力敏感实验研究[J].西安石油大学学报:自然科学版,2015,30(1):30-33,37.
Zhang Haiyong,He Shunli,Luan Guohua,et al.Experimental study on stress sensitivity of microfracture ultra-low permeability reservoirs[J].Journal of Xi'an Shiyou University:Natural Science Edition,2015,30(1):30-33,37.
- [7] 黄远智,王恩志.低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):410-414.
Huang Yuanzhi,Wang Enzhi.Experimental study on coefficient of sensitiveness between percolation rate and effective pressure for low permeability rock[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(2):410-414.
- [8] 张守鹏,滕建彬,尹玉梅,等.胜利探区低渗透油层产液量不足的原因及改造对策[J].石油实验地质,2015,37(4):518-524.
Zhang Shoupeng,Teng Jianbin,Yin Yumei,et al.Causes and countermeasures for low liquid production in low-permeability reservoirs in Shengli region[J].Petroleum Geology & Experiment,2015,37(4):518-524.
- [9] 李玉丹,董平川,张荷,等.低渗透油藏渗透率及启动压力梯度应力敏感性分析[J].油气地质与采收率,2016,23(6):57-63.
Li Yudan,Dong Pingchuan,Zhang He,et al.Stress sensitivity analysis of permeability and threshold pressure gradient in low-permeability reservoir[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(6):57-63.
- [10] 束青林,郭迎春,孙志刚,等.特低渗透油藏渗流机理研究及应用[J].油气地质与采收率,2016,23(5):58-64.
Shu Qinglin,Guo Yingchun,Sun Zhigang,et al.Research and application of percolation mechanism in extra-low permeability oil reservoir[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2016,23(5):58-64.
- [11] 杜玉山,杨勇,郭迎春,等.低渗透油藏地层压力保持水平对油水渗流特征的影响[J].油气地质与采收率,2015,22(3):72-76.
Du Yushan,Yang Yong,Guo Yingchun,et al.Impact of formation pressure maintenance on oil-water seepage characteristics in low permeability reservoirs[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2015,22(3):72-76.
- [12] 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.

编辑 王星