

非均质厚储层多级射孔压裂 裂缝扩展规律

赵振峰 唐梅荣 王成旺

中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018

摘要:为研究常规压裂与多级压裂两种不同改造方式下的裂缝扩展规律及增产机理,制备力学参数接近真实地层的人造岩心,采用真三轴加载方式模拟地层真实三向地应力环境,自主设计并开展了常规射孔压裂与多级射孔压裂物理模拟实验。研究结果表明:多级射孔笼统压裂时纵向应力均质情况下,岩石在射孔位置同时起裂,产生的多条裂缝在垂直方向同时扩展,扩展的裂缝会在裂缝尖端周围产生局部应力,从而彼此干扰,出现复杂裂缝情况。多级射孔分段压裂当第一条裂缝存在时,缝内的压力会改变周围的应力场,进而改变局部最大和最小主应力的方向,进行第二次压裂时,新的裂缝会受到第一条裂缝的局部应力场影响,沿着新的应力方向扩展,并不会与第一条裂缝重合,从而引起空间裂缝的形态变化。相同条件下多级射孔压裂比集中射孔笼统压裂的裂缝面积大,相同施工规模条件下射孔分段数目越多裂缝越复杂,裂缝与储层接触面积越大。针对低渗透非均质厚储层而言,推荐采用多级射孔、分段注入方式进行压裂。

关键词:多级射孔压裂;物理模拟实验;裂缝扩展规律;增产机理

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.03.009

Fracture Propagation Law for Multi-Stage Perforated Fracturing

Zhao Zhenfeng, Tang Meirong, Wang Chengwang

PetroChina Changqing Oilfield Company Oil & Gas Process Institute, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract: To compare the crack propagation law and production increase mechanism under conventional perforated fracturing and multi-stage perforated fracturing, the physical simulation experiments are independently designed and conducted by preparing artificial cores whose mechanical parameters are close to the real strata, the true triaxial loading method is used to simulate the true three-dimensional ground stress environment. The results of the study indicate that in the case of homogeneous stress in the longitudinal fracturing, the rock starts to crack at the same time as the perforation. The multiple cracks produced expand in the vertical direction simultaneously. The extended cracks will generate local stress around the crack tip and thus interfere with each other. So there will be complex cracks. In the case of multi-stage perforated fracturing, when the first crack exists, the pressure in the seam will change the surrounding stress field, and then change the direction of the local maximum and minimum principal stress. During the second fracturing, the new crack will be affected by the local stress field of the first crack,

收稿日期:2018-11-12

基金项目:国家科技重大专项“鄂尔多斯盆地大型低渗透岩性地层油气藏开发示范工程”(2016 ZX 05050)

作者简介:赵振峰(1963-),男,山东滨州人,教授级高级工程师,硕士,长期从事压裂酸化及采油工艺技术研究工作。

spread along the new stress direction, and will not coincide with the first crack, causing the form of the space crack to change. Under the same conditions, multi-stage perforated fracturing has a larger crack area than centralized perforation general fracturing. Under the condition of the same construction scale, the more number of perforation subdivisions, the more complex the cracks and the greater the contact area between fractures and reservoirs. For the heterogeneous and low permeability reservoir, multi-stage perforated segmented fracturing technology is recommended.

Keywords: Multi-stage perforated fracturing; Physical simulation experiment; Fracture propagation law; Mechanism of increasing production

0 前言

在低渗透油气藏非均质厚储层的开发过程中,采用传统集中射孔压裂技术开发效果不明显,裂缝模拟及监测表明:储层纵向难以动用,改造效果有待提高。近年来针对致密厚层采用多级射孔压裂的增产改造手段,取得了较好的试油效果^[1-3]。

国内外学者围绕裂缝延伸机理开展了大量研究,研究表明层间弹性模量差^[4-5]、层间应力差^[6-10]、岩性差异^[11]及施工情况^[10-12]影响了水力压裂裂缝的扩展。大量物理模拟实验在分析裂缝扩展规律的影响因素时并未充分考虑真实厚储层的非均质性程度,同时对多级射孔分段压裂的增产机理及增产效果的阐述不够详尽^[10,13-20]。因此本文结合某油田真实储层非均质条件,

以裂缝与储层接触面积为指标,自主设计并开展了常规集中射孔压裂与多级射孔分段压裂物理模拟实验,研究了常规集中射孔压裂与多级射孔分段压裂两种不同改造方式条件下的裂缝扩展规律及增产机理。本实验研究结果为解释多级射孔压裂增产机理、论证理论研究、指导现场压裂施工提供参考。

1 试样准备及实验方案

1.1 试样制备

在模拟某油田实际储层条件下多级射孔分段压裂过程时,需要根据力学参数相似、地应力相似、几何参数相似、排量相似原理计算出多级射孔分段压裂实验室物理模型参数。本实验条件下实验室物理模型参数与储层参数对应关系见表 1。

表 1 实验室物理模型参数与储层参数对应表

参数名称	实验室模型参数	储层参数	参数名称	实验室模型参数	储层参数
弹性模量 /GPa	13 /17.3	15 /20	模型高 /m	0.6	30
泊松比	0.21	0.21	模型长 /m	0.3	无限大
抗张强度 /MPa	4.2 /5.2	4.2 /5.2	模型宽 /m	0.3	无限大
地应力 /MPa	8-9-11	32-36-45	排量 /(mL·min ⁻¹)	30	6×10 ⁶

为了获得能够模拟实际储层岩石力学性质的岩样,首先开展了不同配方条件下岩石试样制备及其力学性能测试。以水泥、石膏、细石英砂为骨料,按不同比例配方制备试样模拟材料,将每种比例的浇铸块制备成 $\Phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱形岩心试样并进行相关力学测试,使模拟材料的强度、弹性模量及泊松比接近实际地层,最终确定水泥和石英砂的比例为 1:2 和 1:1.88。试样测试结果为:抗张强度 4.2 MPa、弹性模量 13 GPa、泊松比 0.21 和抗张强度 5.2 MPa、弹性模量 17.3 GPa、泊松比 0.21 共两组配方。

其次,按照所获得的配方制备水泥并利用实验模具加工制备不同类型模拟岩样。对于均质岩样的制备,直接用配置好的水泥砂浆浇铸,浇铸过程见图 1。对于非均质岩样的制备,需要将不同层位进行分隔,避免不同类型水泥砂浆混合,因此加工了相应的隔板,在模具不

同空间内灌注不同的水泥砂浆,浇铸过程见图 2。浇铸完成后,使用橡皮锤敲打模具四周,排出气泡。凝固 24 h 后,拆除模具,对试样浇水并用塑料膜包裹,进行一周时间的养护,以保证模拟材料有最好的效果。



图 1 均质岩样制备模具

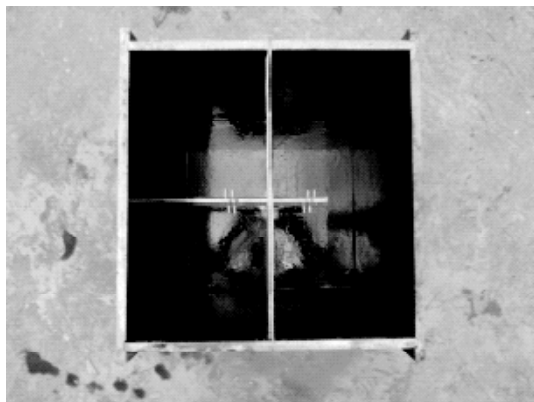


图2 两层非均质岩样制备模具

1.2 实验方案

为了研究非均质厚储层多级射孔分段压裂裂缝扩展规律及增产机理,共设计了6组物理模拟实验方案。

1.2.1 方案1

均质模型 + 集中射孔 + 笼统注入。模拟射孔距离上边界 13.5 cm、射孔段长度 3 cm、距离下边界 13.5 cm、射孔相位 90 度、射孔孔径 0.3 cm、射孔深度 2.5 cm、孔间距离 0.25 cm。采用笼统注入方式 + 注入速度 30 mL/min + 注入液体总量 2.0 L + 观察裂缝扩展规律并测量扩展面积。

1.2.2 方案2

均质模型 + 两级射孔 + 笼统注入。模拟射孔距离上边界 9 cm、射孔段长度 1.5 cm、中间隔层距离 9 cm、射孔段长度 1.5 cm、距离下边界 9 cm、射孔相位 90 度、射孔孔径 0.3 cm、射孔深度 2.5 cm、孔间距离 0.25 cm。采用笼统注入方式 + 注入速度 30 mL/min + 注入液体总量 2.0 L + 观察裂缝扩展规律并测量扩展面积。

1.2.3 方案3

非均质模型 + 两级射孔 + 笼统注入。模型上下两层弹性模量、泊松比、抗压强度不同,采用两级射孔,模拟射孔距离上边界 9 cm、射孔段长度 1.5 cm、中间隔层距离 9 cm、射孔段长度 1.5 cm、距离下边界 9 cm、射孔相位 90 度、射孔孔径 0.3 cm、射孔深度 2.5 cm、孔间距离 0.25 cm。采用笼统注入方式 + 注入速度 30 mL/min + 注入液体总量 2.0 L + 观察裂缝扩展规律并测量扩展面积。

1.2.4 方案4

非均质模型 + 两级射孔 + 分段注入。模型上下两层弹性模量、泊松比、抗压强度不同,采用两级射孔,模拟射孔距离上边界 9 cm、射孔段长度 1.5 cm、中间隔层距离 9 cm、射孔段长度 1.5 cm、距离下边界 9 cm、射孔相位 90 度、射孔孔径 0.3 cm、射孔深度 2.5 cm、孔间距离 0.25 cm。采用分段注入方式 + 注入速度 30 mL/min +

注入液体总量 2.0 L + 观察裂缝扩展规律并测量扩展面积。

1.2.5 方案5

非均质模型 + 三级射孔 + 笼统注入。模型上下两层弹性模量、泊松比、抗压强度不同,采用三级射孔,模拟射孔距离上边界 6.75 cm、射孔段长度 1.0 cm、中间隔层距离 6.75 cm、射孔段长度 1.0 cm、中间隔层距离 6.75 cm、射孔段长度 1.0 cm、距离下边界 6.75 cm、射孔相位 30 度、射孔孔径 0.3 cm、射孔深度 2.5 cm、孔间距离 0.25 cm。采用笼统注入方式 + 注入速度 30 mL/min + 注入液体总量 2.0 L + 观察裂缝扩展规律并测量扩展面积。

1.2.6 方案6

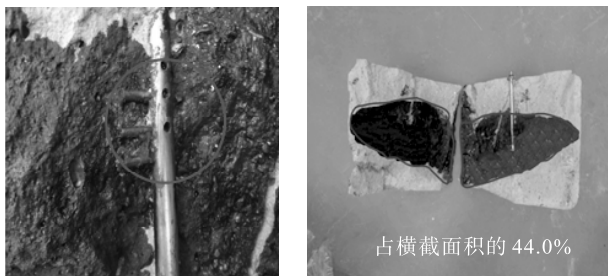
非均质模型 + 三级射孔 + 分段注入。模型上下两层弹性模量、泊松比、抗压强度不同,采用三级射孔,模拟射孔距离上边界 6.75 cm、射孔段长度 1.0 cm、中间隔层距离 6.75 cm、射孔段长度 1.0 cm、中间隔层距离 6.75 cm、射孔段长度 1.0 cm、距离下边界 6.75 cm、射孔相位 90 度、射孔孔径 0.3 cm、射孔深度 2.5 cm、孔间距离 0.25 cm。采用分段注入方式 + 注入速度 30 mL/min + 注入液体总量 2.0 L + 观察裂缝扩展规律并测量扩展面积。

2 实验结果与分析

2.1 集中与多级射孔裂缝扩展对比

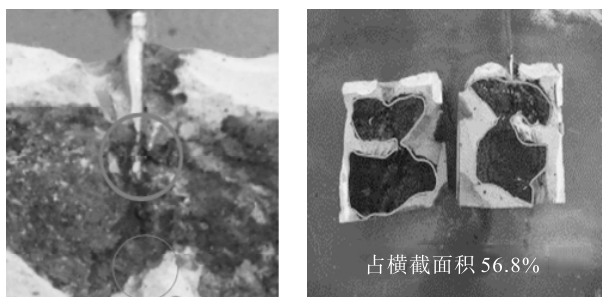
图3为均质模型 + 集中射孔 + 笼统注入条件裂缝扩展及裂缝面积情况。由图3可知,裂缝大致沿水平最大主应力方向开裂,除边缘处向下开裂,基本呈对称双翼裂缝形态,经测量裂缝扩展面积占试样横截面积的 44%。图4为均质模型 + 两级射孔 + 笼统注入条件裂缝扩展及裂缝面积情况。由图4可知,裂缝大致沿水平最大主应力方向开裂,上下两部分形成了明显的两级裂缝,裂缝剖面近似椭圆形,第一射孔段裂缝扩展面积大于第二射孔段裂缝扩展面积,经测量裂缝扩展面积占试样横截面积的 56.8%。

对比分析图3~4可知,两级射孔笼统压裂方式比集中射孔笼统压裂方式的裂缝面积更大,因此同等条件下两级射孔笼统压裂比集中射孔笼统压裂增产效果更好。同时可以发现多级射孔笼统压裂时纵向应力均质情况下,岩石在射孔位置同时起裂,产生的两条裂缝在垂直方向同时扩展,扩展的裂缝会在裂缝尖端周围产生局部应力,从而彼此干扰,所以会出现复杂裂缝情况。



a) 集中射孔管柱 b) 笼统压裂效果

图 3 均质模型 + 集中射孔 + 笼统注入条件
裂缝扩展及裂缝面积情况

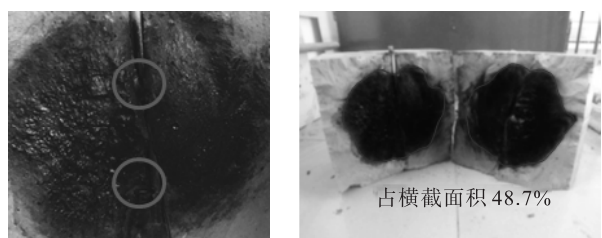


a) 两级射孔管柱 b) 笼统压裂效果

图 4 均质模型 + 两级射孔 + 笼统注入条件
裂缝扩展及裂缝面积情况

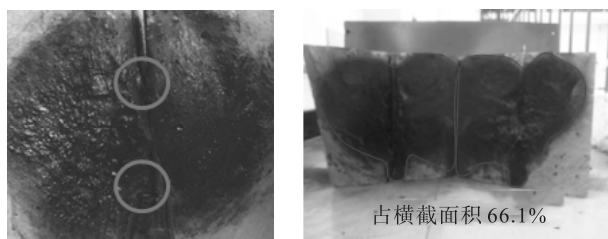
2.2 笼统与分段压裂裂缝扩展对比

图 5 为非均质模型 + 两级射孔 + 笼统注入条件裂缝扩展及裂缝面积情况。图 6 为非均质模型 + 两级射孔 + 分段注入条件裂缝扩展及裂缝面积情况。图 7 为非均质模型 + 三级射孔 + 笼统注入条件裂缝扩展及裂缝面积情况。图 8 为非均质模型 + 三级射孔 + 分段注入条件裂缝扩展及裂缝面积情况。



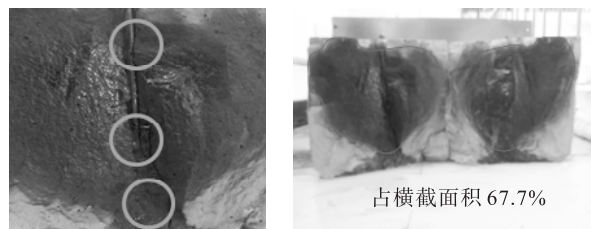
a) 两级射孔管柱 b) 笼统压裂效果

图 5 非均质模型 + 两级射孔 + 笼统注入条件
裂缝扩展及裂缝面积情况



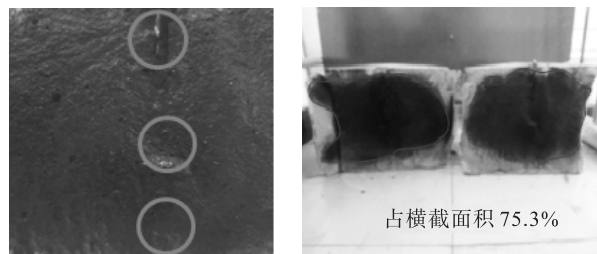
a) 两级射孔管柱 b) 分段压裂效果

图 6 非均质模型 + 两级射孔 + 分段注入条件
裂缝扩展及裂缝面积情况



a) 三级射孔管柱 b) 笼统压裂效果

图 7 非均质模型 + 三级射孔 + 笼统注入条件
裂缝扩展及裂缝面积情况



a) 三级射孔管柱 b) 分段压裂效果

图 8 非均质模型 + 三级射孔 + 分段注入条件
裂缝扩展及裂缝面积情况

压裂实验结果表明,相同施工规模条件下,两层非均质储层两级射孔笼统压裂裂缝扩展面积约占试样总横截面积 48.7%、两级射孔分段压裂裂缝扩展面积约占试样总横截面积 66.1%;相同施工规模条件下,三层非均质储层三级笼统压裂裂缝扩展面积约占总横截面积 67.7%、三级射孔分段压裂裂缝扩展面积约占总横截面积 75.3%。对比分析图 5 和图 6、图 7 和图 8 可知,相同施工规模条件下,多级射孔非均质储层分段压裂比笼统压裂获得的裂缝面积大,即多级射孔分段压裂比笼统压裂效果好。对比分析图 5 和图 7、图 6 和图 8 可知,在相同施工规模条件下,非均质储层三级笼统压裂比二级笼统压裂获得的裂缝扩展面积大 19%,三级分段压裂比二级分段压裂获得的裂缝扩展面积大 9.2%。由此可知,在施工规模,注入方式相同条件下,射孔级数越多,裂缝越复杂,裂缝与储层接触面积越大。

3 结论与认识

1) 本文设计并开展了定点多级压裂物理模拟实验研究,通过室内实验模拟,观测和分析了致密储层常规射孔压裂、多级射孔笼统压裂和多点射孔分段压裂裂缝的起裂和扩展特征,从实验角度直观论证定点多级压裂增产机理。

2) 在笼统压裂方式条件下,分级射孔比集中射孔获得的裂缝面积更大,压裂增产效果更好。在施工规模和射孔级数相同条件下,非均质储层多级射孔分段压裂比笼统压裂获得的裂缝面积大,即多级射孔分段压裂比笼统压裂效果好。在施工规模和注入方式相同条件下,射

孔级数越多,裂缝越复杂,裂缝与储层接触面积越大,压裂效果越好。

3) 针对低渗透非均质厚储层而言,基于多级射孔压裂裂缝扩展规律及增产机理,推荐采用多级射孔、分段注入方式进行压裂。

参考文献:

- [1] 冯福平,雷 扬,胡超洋,等. 水平井分段多簇压裂各射孔簇破裂压力分析[J]. 天然气与石油,2017,35(3):85-91.
Feng Fuping, Lei Yang, Hu Chaoyang, et al. Analysis on Breakdown Pressure of Perforation Clusters in Horizontal Well Staged Multi-Cluster Fracturing [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (3): 85-91.
- [2] 刘建伟,张佩玉,廖天彬,等. 马58 H 致密油藏水平井分段多簇射孔压裂技术[J]. 石油钻采工艺,2015,37(3):88-92.
Liu Jianwei, Zhang Peiyu, Liao Tianbin, et al. Staged Multi-Cluster Perforation Fracturing Technology for Horizontal Well Ma-58 H in Tight Reservoir [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37 (3): 88-92.
- [3] 任 飞,张遂安,李辛子,等. 煤层气水平井分段压裂裂缝参数优化设计[J]. 天然气与石油,2014,32(1):58-62.
Ren Fei, Zhang Suian, Li Xinzi, et al. Optimization Design of Fracture Parameters in Coalbed Methane (CBM) Horizontal Well Staged Fracturing [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32 (1): 58-62.
- [4] Warpinski N R, Clark J A, Schmidt R A, et al. Laboratory Investigation on the Effect of In-Situ Stresses on Hydraulic Fracture Containment [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1982, 22 (3): 333-340.
- [5] Teufel L W, Clark J A. Hydraulic Fracture Propagation in Layered Rock: Experimental Studies of Fracture Containment [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24 (1): 19-32.
- [6] Cleary M P. Analysis of Mechanics and Production for Producing Favourable Shapes of Hydraulic Fractures [C] // Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September, 1980, Dallas, Texas, USA. New York: SPE, 1980.
- [7] Biot M A, Medlin W L, Masse L. Fracture Penetration Through an Interface [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, 23 (6): 857-868.
- [8] Hanson M E, Shaffer R J. Some Results from Continuum Mechanics Analyses of the Hydraulic Fracture Process [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1980, 20 (2): 86-94.
- [9] Simonson E R, Abou-Sayed A S, Clifton R J. Containment of Massive Hydraulic Fractures [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1978, 18 (1): 27-32.
- [10] 刘玉章,付海峰,丁云宏,等. 层间应力差对水力裂缝扩展影响的大尺度实验模拟与分析[J]. 石油钻采工艺,2014,36(4):88-92.
Liu Yuzhang, Fu Haifeng, Ding Yunhong, et al. Large Scale Experimental Simulation and Analysis of Interlayer Stress Difference Effect on Hydraulic Fracture Extension [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36 (4): 88-92.
- [11] 王文东,苏玉亮,慕立俊,等. 致密油藏直井体积压裂储层改造体积的影响因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(3):93-97.
Wang Wendong, Su Yuliang, Mu Lijun, et al. Influencing Factors of Stimulated Reservoir Volume of Vertical Wells in Tight Oil Reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37 (3): 93-97.
- [12] 陈军斌,魏 波,王汉青. 定向射孔参数对压裂裂缝扩展规律的影响[J]. 断块油气田,2017,24(3):391-395.
Chen Junbin, Wei Bo, Wang Hanqing. Influence of Directional Perforation Parameters on Fracture Propagation [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24 (3): 391-395.
- [13] Bai J, Martysevich V, Walters H, et al. Laboratory-Scale Hydraulic Fracturing: Experiment and Numerical Modeling [C] // Proceedings of 50th U. S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 26-29 June, 2016, Houston, Texas, USA. Alexandria: American Rock Mechanics Association, 2016.
- [14] 常 琨. 疏松砂岩人工裂缝起裂及延伸规律研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2013.
Chang Kun. Study on the Fracture Initiation and Propagation Law for Unconsolidated Sandstone [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2013.
- [15] 刘 鹏. 砂砾岩水压致裂机理的实验与数值模拟研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2017.
Liu Peng. Experimental and Numerical Simulating Studies on Hydrofracturing Mechanism of Glutenite [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2017.
- [16] 张矿生,唐梅荣,杜现飞,等. 致密薄互层缝高扩展影响因素的试验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(22):197-203.
Zhang Kuangsheng, Tang Meirong, Du Xianfei, et al. The Experimental Investigation of Hydraulic Fracture Height Propagation in Tight Thin Interbeds [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (22): 197-203.