

射孔对井眼围岩应力场及破裂压力影响规律

刘建军^{1,2}, 于献彬¹, 熊欢¹, 张林志¹

1. 西南石油大学土木与建筑工程学院, 成都 610500
2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610500

摘要 射孔在一定程度上可以有效地降低地层破裂压力, 避免裂缝扭曲和多裂缝的不利现象; 射孔参数的改变会导致井壁围岩应力场及破裂压力的改变, 进而影响压裂施工和压后产能。加强射孔井壁围岩应力场的动态演化规律研究, 对指导水力压裂施工、井壁稳定性、储层改造等具有重要的意义。利用 ABAQUS 有限元计算软件建立套管-水泥环-地层的三维数值模型, 在考虑流固耦合效应和动态效应的基础上, 运用单一变量理论对不同的射孔密度、射孔长度、射孔方位角等射孔参数进行模拟分析, 得到井壁围岩应力分布及水力压裂破裂压力的定性认识并给出最优的射孔参数。研究结果可为压裂井射孔工艺技术优化设计提供一定的理论指导。

关键词 射孔参数; 应力场; 破裂压力; ABAQUS

中图分类号 TQ050.4*25

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.04.006

Influence of Perforation on the Wellbore Surrounding Rock Stress and Fracture Pressure

LIU Jianjun^{1,2}, YU Xianbin¹, XIONG Huan¹, ZHANG Linzhi¹

1. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract The perforation, to a certain extent, can effectively reduce the formation fracture pressure to avoid cracked distortions and multiple fractures. And the perforation parameters are related with the borehole wall surrounding rock stress and the fracture pressure, thereby, the fracturing pressure capacity and the dynamic evolution of the perforation shaft wall surrounding rock stress field are important issues for the hydraulic fracturing operation, the wellbore stability, and the reservoir reconstruction. In this paper, firstly, using the finite element analysis software ABAQUS, a three-dimensional numerical model of the casing-cement ring-formation is established to study the fluid-structure coupling effects and the dynamic effects. A qualitative understanding of the borehole wall surrounding rock stress distribution and the hydraulic fracturing breakdown pressure is achieved and the optimal perforating parameters are obtained by the numerical simulation on the basis of the single variable theory for the perforation parameters, including the perforation density, the perforation length, and the perforation azimuth. The results provide some theoretical guidance for the fractured well perforating technology optimization design.

Keywords perforating parameters; stress field; fracture pressure; ABAQUS

0 引言

射孔在一定程度上能够有效降低储层岩石的破裂压力, 避免裂缝扭曲和多裂缝的不利现象^[1], 然而射孔的存在会使

原来的平衡状态遭到破坏, 尤其是井眼与孔眼接合的位置, 导致井壁围岩应力发生重新分布, 研究射孔后井壁围岩应力场的分布规律可为压裂井射孔工艺技术优化设计提供理论

收稿日期: 2012-11-04; 修回日期: 2012-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174170); 国家科技重大专项(2011ZX05013-006-005)

作者简介: 刘建军, 教授, 研究方向为渗流力学, 电子信箱: 391140281@qq.com

支持^[2]。随着射孔完井技术的广泛应用,国内外许多学者对射孔井井眼及孔眼围岩应力分布及地层破裂压力进行了大量的理论分析及实验研究。

理论分析方面,根据抗拉强度准则,Hossain等^[3]推导了垂直井和水平井裸眼完井和套管完井下地层破裂所需要的地面压力,并给出了裂缝起裂方向与孔眼轴线间的夹角;Hailey等^[4]推导了地层破裂所需要压力的数学表达式;Morales等^[5]利用水力压裂模拟软件,给出了加大射孔密度、孔眼直径及沿着最大主应力方向180°射孔可以降低压耗的结论;胡永全等^[6]将岩石作为线弹性体,利用有限元分析软件得到了射孔孔眼周围的应力分布,根据岩石破裂准则可以得到水力起裂压力及裂缝起裂方位;刘翔^[7]运用解析方法分析了射孔后孔眼围岩地应力分布,并结合抗拉强度准则给出破裂压力随射孔参数的变化规律,彪仿俊等^[8]利用有限分析软件研究了螺旋射孔条件下,射孔参数(射孔方位角、相位角、射孔密度)对地层破裂压力的影响,并给出了地层破裂压力的变化规律;王素玲等^[9]利用有限元分析方法研究了低渗透储层射孔参数对地层破裂压力的影响,并根据计算结果给出了最优射孔参数。以上研究对推导射孔参数对井眼应力场及破裂压力规律的研究起到重要作用,但是上述研究大多采用静态分析方法且很少考虑流固耦合作用,这样的简化分析不符合实际。

实验方面,Behrmann和Elbel^[10]借助实验,研究了套管井参数对裂缝起裂的影响,并给出了射孔参数对裂缝起裂影响规律;van de Ketterij和de Pater^[11]实验研究了射孔参数(射孔相位、间距、射孔轴线)对裂缝参数的影响;黄中伟和李根生^[10]通过室内模拟实验,研究了射孔参数对裂缝起裂的影响,研究结果显示,起裂压力随着射孔深度和直径的增加而降低,随着射孔轴线和最大主应力之间夹角的增加而增大;邓金根等^[12]通过室内真三轴水力压裂模拟试验及数值计算,研究了定向射孔对裂缝起裂压力、起裂位置等的影响,并给出了破裂压力与射孔参数的变化规律。上述实验研究对人们定性认识射孔参数与破裂压力之间的变化关系起到了重要作用,但是由于岩心尺寸效应及岩心物性对地层破裂压力的影响^[13],且室内实验条件同井底岩石所处的受力状态存在差异,都会使实验结果同实测值存在较大误差。

本文在前人理论及实验分析的基础上,借助ABAQUS有限元分析软件,基于流固耦合理论,研究螺旋射孔条件下射孔参数(直径、长度、方位角、密度)对井眼及孔眼围岩应力场

动态变化规律,并结合岩石抗拉强度准则确定地层破裂压力,最后给出最优射孔参数。

1 数值计算模型建立

1.1 基本假设

为了便于重点分析射孔参数对储层井眼及孔眼应力场及破裂压力的影响,对数值模型作如下假设^[1]:

- (1) 开始注入流体时,井筒内及所有射孔内的流体压力是相等,忽略流体重力作用;
- (2) 流体渗入地层引起的附近应力场忽略不计;
- (3) 地层为弹塑性本构关系,服从摩尔-库伦准则;
- (4) 岩石满足最大主应力准则;
- (5) 套管、水泥环、地层之间完好胶结,不考虑它们之间的相对滑移变形。

1.2 模型参数选取

1.2.1 几何参数

限于篇幅,选取以下典型模型进行研究。模型选取地下1500m的砂岩储层,储层厚度为1m,射孔段位于此储层厚度上,为了消除边界对计算结果的影响,储层上部和下部分别增加1m和2m厚的无射孔边界岩层^[1]。射孔最大长度为1m,计算模型尺寸为20m×20m×4m,满足文献[3]和文献[7]关于计算区域对计算结果影响的要求。选取射孔密度4/m,射孔方位角为45°,相位角为90°,射孔长度为1.0m,射孔直径为20mm,几何模型示意图如图1所示。

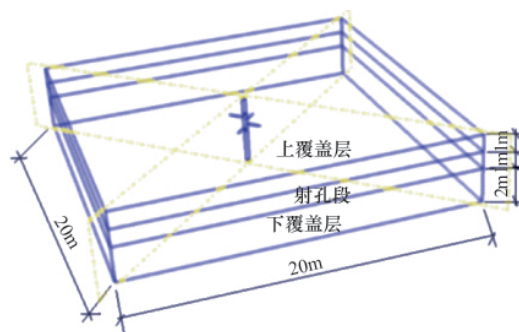


图1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

1.2.2 材料参数

通过室内物性试验得到材料的力学参数,套管、水泥环、岩石的力学参数如表1所示。

表1 模拟区域的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the simulation area

材料	弹性模量/MPa	泊松比 μ	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	膨胀角/ $^{\circ}$	孔隙比/%	抗拉强度/MPa	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
套管	2.1×10^5	0.30	7800	—	—	—	—	—	—
水泥环	3.0×10^4	0.25	2800	25.0	22.0	11.0	—	—	—
砂岩	2.3×10^4	0.28	2300	21.5	20.0	9.0	30	3.4	12

1.3 数值模型的前处理设置

1.3.1 初始条件及边界条件

初始孔隙比为 0.3;初始孔隙压力 14.5MPa;初始地应力: x 方向为 25MPa, y 方向为 20MPa, z 方向为 30MPa,剪应力为 0;边界条件主要有力的边界条件和位移边界条件, x,y 方向受到地应力的大小分别为 25、20MPa,下表面约束 z 向位移,上表面施加 30MPa 的均布压力荷载,外缘边界具有渗透行为,孔隙压力等于初始孔隙压力,如图 2 所示。

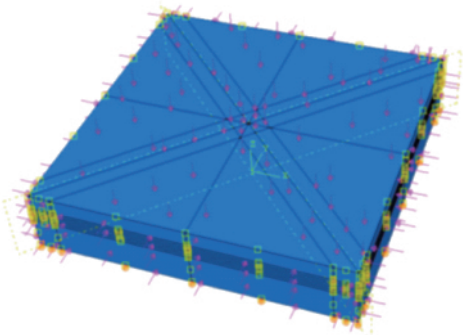


图 2 边界条件

Fig. 2 Boundary conditions

1.3.2 网格划分

网格质量直接影响到有限元分析结果的精度,对于三维计算模型,ABAQUS 有限元分析软件进行流固耦合分析时,需要采用六面体孔压单元。围岩体的应力由于受到井眼及孔眼的影响,在井眼及孔眼附近易发生应力集中现象,因此在井眼及孔眼附近对网格进行细化,远处适当增大网格以满足数值模拟精度及速度的要求^[3]。选取射孔密度 4/m,射孔方位角 45°,射孔长度 1.0m,射孔直径 20mm 为例,网格数目为 12000 个,节点数目为 13668 个,单元类型为 C3D8P,网格划分如图 3 所示。

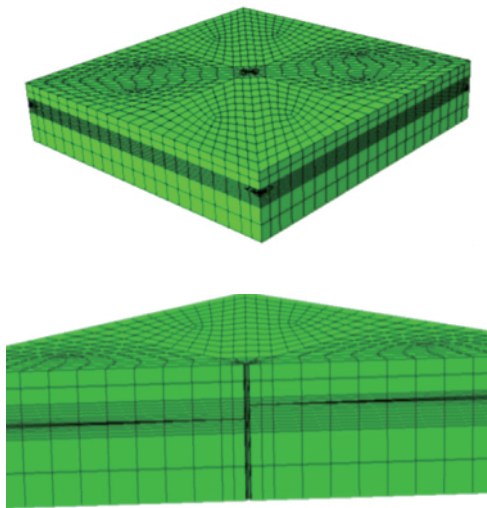


图 3 数值模型网格划分示意图

Fig. 3 The meshing of numerical model

1.3.3 计算工况

为了研究需要,固定射孔相位角为 90°,以射孔其它参数为变量,根据前人的研究及现场收集的数据,主要按照以下几种工况进行数值模拟。

(1) 射孔密度为变量,其值分别为:1,4,8,16,24/m;射孔长度:1.0m;射孔方位角:45°;射孔直径:20mm。

(2) 射孔长度为变量,其值分别为:0.2,0.4,0.6,0.8,1.0m;射孔密度:4/m;射孔方位角:45°;射孔直径 20mm。

(3) 射孔直径为变量,其值分别为:10,15,20,25,30mm;射孔密度:4/m;射孔长度:1.0m;射孔方位角:45°。

(4) 射孔方位角为变量,其值分别为:0°,30°,45°,60°,90°;射孔密度:4/m;射孔长度:1.0m;射孔直径:20mm。

其中,射孔相位角为相邻射孔孔眼轴线投影到同一水平面上的夹角,一般为 60°或 90°;射孔方位角为孔眼轴线与最大水平地应力之间的夹角。

1.3.4 分析步设置

本文主要从两个分析步进行数值模拟,首先是平衡地应力场,然后对储层井壁及孔壁施加相等的流体压力进行数值模拟。

2 地层破裂压力的判断准则

地层破裂的判断依据很多,文章采用最大拉应力准则,即当岩石的最大应力大于岩石的抗拉强度时,认为岩石发生破裂,数学表达式为^[7]

$$\sigma_{\max} \geq P_s \quad (1)$$

式中, σ_{\max} 为最大主应力,由数值模拟结果直接得到,MPa, P_s 为岩石的抗拉强度,由室内物性实验得到,MPa。

在保持其他外界条件不变的情况,通过试算的方法获取地层破裂压力值,即在井壁及孔壁施加孔隙压力,得到岩石最大主应力,将此主应力值与岩石的抗拉强度进行比较,若最大主应力值与岩石的抗拉强度相等,则施加的压力即为地层的破裂压力;否则改变孔隙压力值,直到等于岩石的抗拉强度^[7]。获取射孔孔眼根部及端部的破裂压力采用同样方法。

3 数值模拟及结果分析

基于流固耦合理论,利用 ABAQUS 有限元分析软件,通过数值计算得到井眼及孔眼附近岩石应力的动态变化规律。以射孔密度 4/m,射孔方位角 90°,射孔长度 1.0m,射孔直径 20mm 为例,给出此工况下,井眼及孔眼附近岩石最大主应力及 Mises 应力云图。然后通过试算,根据最大拉应力准则,给出地层破裂压力与射孔参数的变化曲线。

3.1 某工况下最大主应力及 Mises 应力云图

以 4/m,射孔方位角为 45°,射孔长度 1.0m,射孔直径 20mm 为例,给出此工况下,孔眼根部及端部发生破裂时,井眼及孔眼附近岩石最大主应力及 Mises 应力云图。为了更加直观地观察井眼及孔眼附近岩石的应力分布,将计算模型利

用通过坐标原点且以(1,1,0)为法线的平面将其剖开,最大主应力及 Mises 应力云图如图 4~图 7 所示。

图 4 为井眼及孔眼施加流体压力为 25MPa 时最大主应

力云图,由图可以看出,当方位角为 45°的孔眼根部岩石最大主应力达到 3.4MPa 发生破裂时,井壁及孔壁其他部位最大主应力很小,甚至仍处于压应力状态,不会发生破裂,可以得

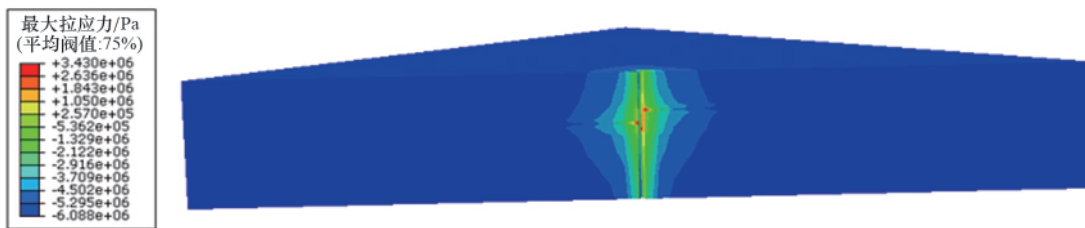


图 4 孔眼根部发生破裂时最大主应力云图

Fig. 4 The maximum principal stress cloud at eyelet root rupture



图 5 孔眼根部发生破裂时 Mises 应力云图

Fig. 5 The von Mises stress cloud at eyelet root rupture

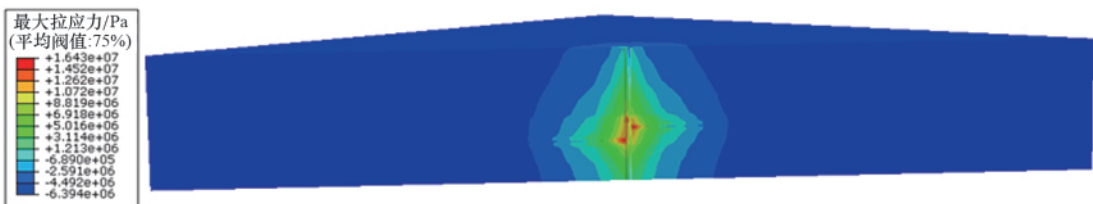


图 6 孔眼端部发生破裂时最大主应力云图

Fig. 6 The maximum principal stress cloud at eyelet end rupture

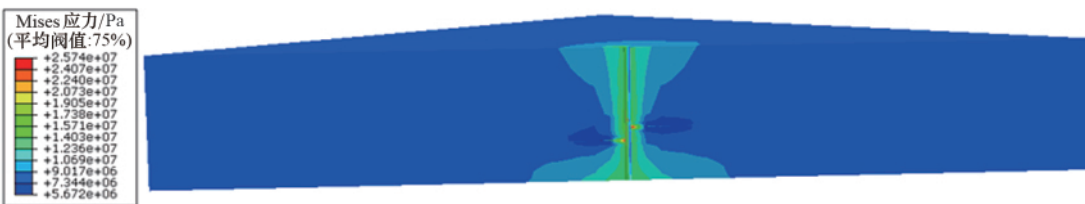


图 7 孔眼端部发生破裂时 Mises 应力云图

Fig. 7 The von Mises stress cloud at eyelet end rupture

到孔眼根部最容易发生破裂,破裂时所需流体压力最小。图 5 为相应的 Mises 应力云图,由图可以看出,孔眼及孔眼附近的 Mises 应力最大,Mises 应力值达到 20MPa,而其他部分的 Mises 应力值较小,大约为 9MPa,可以得到井眼及孔眼附近岩石易发生应力集中现象,也是容易发生破坏的部位。

图 6 为井眼及孔眼施加流体压力为 39MPa 时最大主应力云图,由图可以看出,当方位角为 45°的孔眼端部岩石最大

主应力达到 3.4MPa 发生破裂时,孔眼根部最大主应力达到 16.4MPa,远大于岩石的破裂压力 3.4MPa,可以得到孔眼根部最容易发生破裂,破裂时所需要的流体压力较小。图 7 为相应的 Mises 应力云图,从图中可以看出,孔眼及孔眼附近的 Mises 应力最大,Mises 应力值达到 25MPa,而其他部分的 Mises 应力值较小,大约是 10MPa,可以得到井眼及孔眼附近岩石易发生应力集中现象,也是容易发生破坏的部位。

比较图 4 及图 6 可以得到,孔眼根部岩石更容易发生破裂,相同条件下,所需要的破裂压力值较小。在所工况下,孔眼根部岩石破裂压力大约是岩石根部破裂压力的 1.56 倍。

3.2 射孔参数对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响

采用单一变量理论,借助 ABAQUS 分析软件分别模拟不同射孔密度、射孔长度、射孔直径、方位角对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响,根据最大拉应力强度准则,确定每一种工况下的岩石破裂压力,并分别给出岩石破裂压力与每一种射孔参数的影响曲线,如图 8~图 11 所示。同时根据影响曲线给出所取条件下的最优射孔参数。

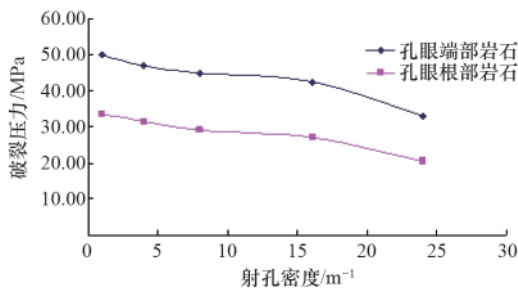


图 8 射孔密度对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响曲线
Fig. 8 The influence of perforation density on the rock fracture pressure at eyelet end and the roots

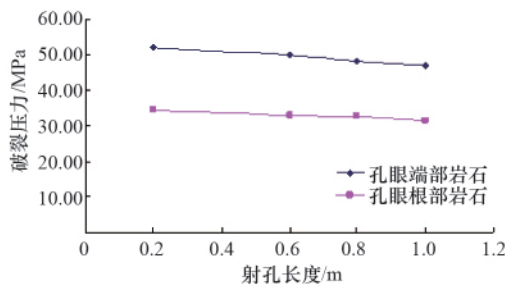


图 9 射孔长度对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响曲线
Fig. 9 The influence of perforation length on the rock fracture pressure of eyelet end and the roots

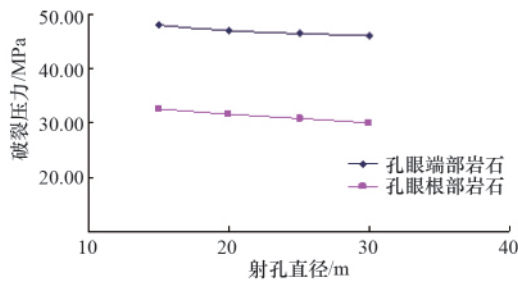


图 10 射孔直径对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响曲线
Fig. 10 The influence of perforation diameter on the rock fracture pressure of eyelet end and the roots

根据图 8 可以看出,孔眼端部和根部岩石破裂压力随射孔密度的变化趋势基本一致。当射孔密度由 1/m 增加到 8/m

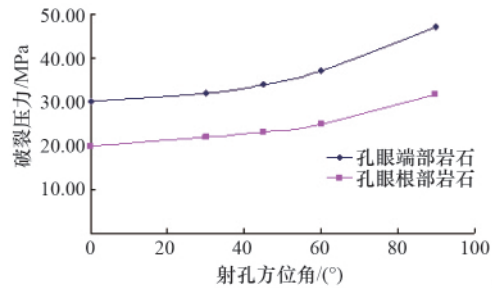


图 11 射孔方位角对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响曲线
Fig. 11 The influence of perforation azimuth on the rock fracture pressure of eyelet end and the roots

时,岩石破裂压力显著降低,当射孔密度由 8/m 增加到 16/m 时,破裂压裂变化较小,当射孔密度继续增加,岩石破裂压力降低较为显著。但考虑到射孔的存在必然导致套管强度降低,射孔数目越多套管强度降低越大,根据图 8 的变化趋势,确定 12/m 作为射孔密度的最优值,与张广清等^[4]给出的 13/m 左右作为射孔密度最优值基本一致。

由图 9 可以看出,射孔长度对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响规律基本一致。随着射孔长度的增加破裂压力基本呈线性递减,与射孔密度递减的幅度相比,变化趋势较小。当射孔长度由 0.2m 增加到 0.6m 时,破裂压力降低幅度较大,而由 0.6m 增加到 1m 时,破裂压力降低较小,所以将射孔长度的最优值确定为 0.6m。

由图 10 可以看出,射孔直径对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响规律基本一致。随着射孔直径的增加破裂压力基本呈线性递减,但是递减的幅度不很明显。

由图 11 可以看出,射孔方位对孔眼根部及根部岩石破裂压力的影响规律基本一致。随着射孔方位角的增大破裂压力基本呈上升趋势,0°增大到 30°时,破裂压力增加的幅度较小,30°增大到 60°时,破裂压力增加的幅度变大,60°增大到 90°时,增加的幅度最大,得到的变化规律曲线与文献[2]和[15]给出的方位角与破裂压力的变坏规律基本相符。90°与 0°相比,对于射孔端部和根部破裂压力增大幅度分别达到 58.0% 和 66.7%,增加幅度非常明显。

4 结论

(1) 随着孔眼及井眼施加流体压力的增加,井眼及孔眼附近围岩 Mises 应力逐渐增大,在施加流体压力对地层进行压裂时,要保证围岩体 Mises 应力不应过大,防止套管发生破裂。

(2) 相同外部条件下,孔眼根部岩石的破裂压力比孔眼根部岩石的破裂压力大。这与孔眼与井眼接合部位的受力状态有关。

(3) 射孔参数对射孔根部及根部岩石破裂压力的影响规律基本一致。

(4) 射孔密度与射孔方位角对射孔根部及根部岩石破裂

压力的影响明显,相比之下射孔直径及射孔长度对破裂压力的影响不很明显。

(5) 在本文所取计算模型及分析工况下,射孔参数的最优值为:射孔密度 12/m,方位角 45°~60°(主应力方向不确定),射孔直径 20mm,射孔长度 0.6m。

参考文献 (References)

- [1] 彪俊俊, 刘合, 张劲, 等. 螺旋射孔条件下地层破裂压力的数值模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, 41(3): 219-226.
Biao Fangjun, Liu He, Zhang Jin, et al. Journal of University of Science and Technology of China, 2011, 41(3): 219-226.
- [2] 刘翔. 垂直射孔井地应力及破裂压力研究 [J]. 钻采工艺, 2008, 31(2): 36-38.
Liu Xiang. Drilling & Production Technology, 2008, 31(2): 36-38.
- [3] Hossain M M, Rohman M K, Rahman S S. A comprehensive monograph for hydraulic fracture initiation form deviated wellbore under arbitrary stress regimes [C]. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, April 20-22, 1999.
- [4] Hainey B W, Weng X, Stoitsits R F. Mitigation of multiple fractures from deviated wellbores[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, October 22-25, 1995.
- [5] Morales R H, Brady B H. Three-dimensional analysis and valuation of the wellbore and the fracturing process in inclined wells[C]. Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, Colorado, April 26-28, 1993.
- [6] 胡永全, 赵金洲, 曾庆坤, 等. 计算射孔井水力压裂破裂压力的有限元方法[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 58-60.
Hu Yongquan, Zhao Jinzhou, Zeng Qingkun, et al. Natural Gas Industry, 2003, 23(2): 58-60.
- [7] 王素玲, 董康兴, 董海洋. 低渗透储层射孔参数对起裂压力的影响[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3): 85-89.
Wang Suling, Dong Kangxing, Dong Haiyang. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31(3): 85-89.
- [8] Behrmann L A, Elbel J L. Effect of perforation on fracture initiation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(5): 608-615.
- [9] van de Ketterij R G, de Pater C J. Experimental study on the impact of perforation on hydraulic fracture tortuosity[C]. SPE European Formation Damage Conference, Hague, Netherlands, June 2-3, 1997.
- [10] 黄中伟, 李根生. 水力射孔参数对起裂压力影响的实验研究[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 48-54.
Huang Zhongwei, Li Gensheng. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(6): 48-54.
- [11] 邓金根, 蔚宝华, 王金凤, 等. 定向射孔提高低渗透油藏水力压裂效率的模拟试验研究[J]. 石油钻探技术, 2003, 31(5): 14-16.
Deng Jingen, Yu Baohua, Wang Jinfeng, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2003, 31(5): 14-16.
- [12] 李根生, 黄中伟, 牛继磊, 等. 地应力及射孔参数对水力压裂影响的研究进展[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(4): 136-142.
Li Gensheng, Huang Zhongwei, Niu Jilei, et al. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2005, 29(4): 136-142.
- [13] Liu J J, Yu X B. Stress analysis on the combination of casing-cement ring-surrounding rock considering fluid-solid coupling [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17(J): 1683-1693.
- [14] 张广清, 陈勉, 殷有泉, 等. 射孔对地层破裂压力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 40-44.
Zhang Guangqing, Chen Mian, Yin Youquan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 40-44.
- [15] 陈实, 刘啸峰, 刘斌. 川西深层射孔参数对地层破裂压力影响规律研究[J]. 复杂油气藏, 2010, 3(1): 73-76.
Chen Shi, Liu Xiaofeng, Liu Bin. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2010, 3(1): 73-76.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

老科学家学术成长资料采集工程

老科学家是共和国科技发展历史的“活档案”。2009年中国科协向国务院报送的《老科学家学术成长历史资料亟待抢救》受到高度重视。有关领导责成中国科协牵头,联合相关部门共同组织实施老科学家学术成长资料采集工程。

“老科学家学术成长资料采集工程”于2010年正式启动。将以学术成长经历为主线,重点面向年龄在80岁以上的两院院士,或虽不是两院院士,但在中国科技事业发展中作出突出贡献的老科学家(院士和非院士的比例为8:2)。系统采集反映老科学家家庭背景、求学历程、师承关系,尤其是对老科学家日后科学成就产生深刻影响的工作环境、学术交往中关键节点和重要事件的口述历史资料,以及真实反映老科学家学术思想、观点和理念产生、形成、发展过程的实物资料和图像资料等,集中整理存储,进行数字化加工和宣传展示工作。

详情见中国科协网 <http://www.cast.org.cn>。