

低渗油藏径向水力射流压裂裂缝延伸规律

张丁涌¹, 袁士宝², 田相雷¹, 张伟¹, 左家强³

(1. 中国石化胜利油田分公司现河采油厂, 山东东营 257068; 2. 西安石油大学石油工程学院, 陕西西安 710065;
3. 中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东东营 257000)

摘要: 基于扩展有限元法基本理论, 建立水力径向射流压裂裂缝延伸三维有限元模型, 结合岩石的抗拉破坏准则, 研究径向钻孔参数包括钻孔孔径、钻孔方位角及钻孔深度对地层破裂压力的影响。结果表明: 随着孔眼直径的增加, 起裂压力呈明显的线性降低趋势; 地层破裂压力随着射孔方位角的增加而增大, 40°为获得地层低破裂压力所允许的临界射孔方位角, 优化钻孔与最大水平地应力的最佳夹角不超过40°; 不同射孔角度下压裂裂缝扩展规律亦不同。

关键词: 低渗透; 径向水力射流; 压裂; 裂缝延伸

中图分类号: TE 24 **文献标志码:** A

引用格式: 张丁涌, 袁士宝, 田相雷, 等. 低渗油藏径向水力射流压裂裂缝延伸规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(2): 129-134.

ZHANG Dingyong, YUAN Shibao, TIAN Xianglei, et al. Research on fracturing extension by radial hydraulic jet in low permeability reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 129-134.

Research on fracturing extension by radial hydraulic jet in low permeability reservoirs

ZHANG Dingyong¹, YUAN Shibao², TIAN Xianglei¹, ZHANG Wei¹, ZUO Jiaqiang³

(1. Xianhe Oil Production Plant of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257068, China;

2. College of Petroleum Engineering in Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

3. Research Institute of Production Engineering of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Based on the extended finite element method and combining with the criterion of tensile resistance failure, a three-dimensional finite element model of radial hydraulic jet fracturing fracture was built to study the influences of drilling pore diameter, drilling pore azimuth and depth on formation fracturing pressure. The results show that, with the increase of drilling pore diameter, the initiation fracture pressure has a significant linearly decreasing tendency. The formation fracturing pressure increases with the increase of perforation azimuth. 40° is the allowed critical perforation azimuth to obtain the low formation fracturing pressure. A angle less than 40° between the optimizing bore and the maximum horizontal stress is better. The propagation law of fracturing fracture varies under different perforation angles.

Keywords: low permeability; radial hydraulic jet; fracture; fracture extension

径向水力喷射技术解决了开发低渗透油田采收率低的难题^[1], 克服了以往水力深穿透技术径向孔眼深度较短的缺点, 且费用低、效率高, 是低渗油藏开发方式的一项技术突破^[2]。裂缝扩展主要着手于径向深穿透射孔方向与最大主应力夹角对压裂裂

缝起裂-扩展方向的影响^[3]。通常裂缝沿着最大主应力方向延伸, 但在径向深穿透射孔的情况下, 裂缝可能初期沿着径向射孔方向扩展, 随后转向到最大主应力方向上, 因此是一个裂缝转向的问题^[4]。近年来国内外学者在常规射孔对地层破裂压力的影响

方面做了一些研究,然而,水力喷射径向钻孔在钻孔方式和钻孔参数上相比于常规射孔枪射孔有很大的区别,而室内真三轴水力压裂模拟受到岩心尺寸的限制,难以实现径向钻孔的物理模拟实验。笔者建立水力径向射流压裂裂缝扩展三维有限元模型,结合岩石的抗拉破坏准则研究径向钻孔参数包括钻孔孔径、方位角及钻孔深度对地层破裂压力的影响。

1 水力径向钻孔有限元模型建立

1.1 力学模型建立

以径向钻孔油层为研究对象,埋深为 2 500 m,基体尺寸为 400 m×400 m×20 m,井筒直径为 179.3 mm,选取的地层区域范围远远大于井筒直径,同时经过试算,确保在相同条件下扩大有限元计算范围不影响计算结果。三向远地应力场的水平最大、最小主应力分别为 48.2 和 41.3 MPa,垂向地应力为 55.2 MPa,见图 1。

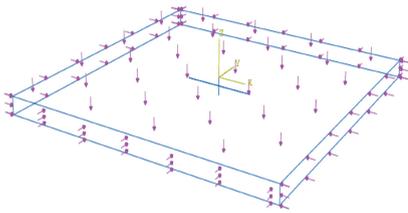


图 1 地层岩石力学模型

Fig. 1 Formation rock mechanics model

假设地层岩石为线弹性模型,各向同性,岩石力学参数:弹性模量为 35 GPa,泊松比为 0.265,岩石的抗拉强度为 3.5 MPa。径向钻孔参数参照实际施工情况选取,钻孔孔径为 30 ~ 50 mm,钻孔方位角(与水平最大主应力方向夹角)从 0° ~ 90° 变化,钻孔深度为 50 ~ 100 m。为消除钻孔尖端尖角或急剧过渡对计算结果的影响,钻孔尖端形状为圆柱形,顶部为半球状^[5]。

模型上的载荷及边界条件:①地层外边界水平方向上的最大、最小主应力 σ_H 、 σ_h ;②地层顶面的上覆压力 σ_v ,地层底面施加的 Z 方向为零的约束;③作用在井眼内壁和孔眼内壁的液柱压力。

1.2 有限元模型网格划分

对于径向钻孔计算模型,为达到计算精度要求,须对井筒及长达几十米的径向钻孔区域进行网格加密。采用四面体网格对径向钻孔区域进行加密,用三角形网格划分边界储层的复合网格划分方法对径向钻孔计算模型进行网格划分,如图 2 所示。

1.3 裂缝起裂判断准则

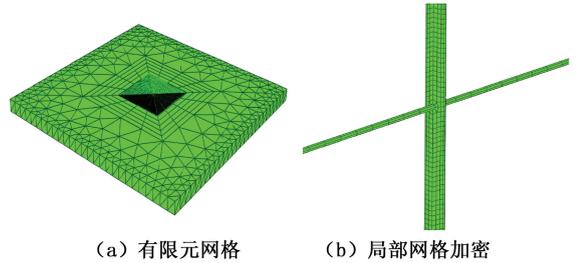
为保证裂缝起裂压力预测的准确性,采用张性

破裂准则预测方法根据最大拉应力理论和压裂中岩石开裂的 I 型裂缝^[6]开裂形态,如果岩石的拉伸应力达到岩石的抗拉强度以上时,岩石发生断裂并开始出现裂缝,判断准则表示为

$$\sigma_{\max} \geq T_0 \tag{1}$$

式中, σ_{\max} 为最大主应力,MPa; T_0 为岩石的抗拉强度,MPa。

采用试算法计算水力射流井的地层破裂压力^[7]。



(a) 有限元网格 (b) 局部网格加密

图 2 地层岩体有限元网格划分

Fig. 2 Formation rock mass finite element mesh division

2 水力径向钻孔参数影响因素

2.1 钻孔深度

水力径向钻孔孔眼的深度与喷射工具和地层条件有关,不考虑孔眼直径的变化,只改变射孔深度,分别取 50、60、70、80、90 m,计算结果见图 3。

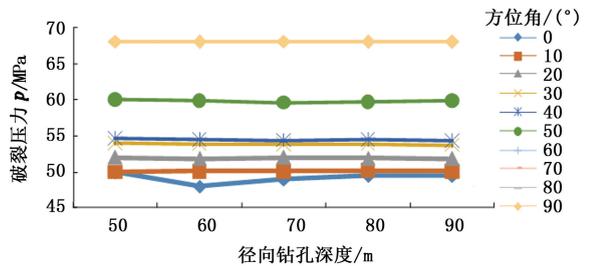


图 3 水力径向钻孔深度与起裂压力关系

Fig. 3 Relationship between hydraulic radial drilling depth and crack stress in different pore sizes and azimuth angle

常规射孔对于起裂压力而言,起裂压力会随着其深度的增加而出现先减后增的趋势^[8],径向钻孔相对常规射孔而言,其孔深要远远大于常规孔深。当钻孔深度较小时,近井筒附近的地应力对起裂压力具有较大的影响;但是随着孔深的增大,起裂压力受远场地应力的影响逐渐增大^[9-12]。由计算结果可以看出,钻孔深度在 50 ~ 100 m 变化时,对地层的破裂压力影响很微弱。

2.2 水力径向钻孔方位角

钻孔长度和直径固定不变,分别为 50 m、40 mm。同样采用试算法计算水力射流井的地层破裂

压力,对每种工况进行计算得到起裂压力和钻孔井眼处应力分布分别见图 4、5。

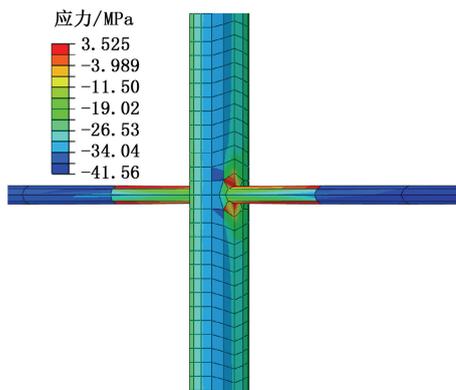


图 4 双径向钻孔井眼及钻孔剖面应力分布
Fig. 4 Double radial drilling hole and drilling section stress distribution

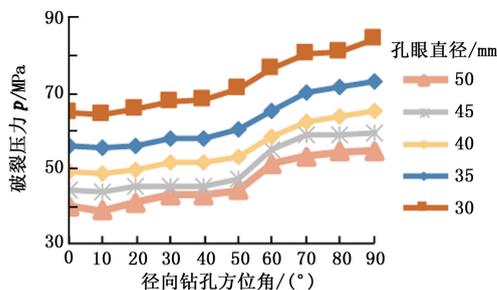


图 5 钻孔方位角与起裂压力关系
Fig. 5 Relations between drilling azimuth and crack pressure

通过计算可以发现,地层起裂压力与钻孔方位角有关,并随方位角的增大而增大,方位角在 40° 以内时,起裂压力变化并不明显,当方位角处于 $40^\circ \sim 70^\circ$ 时,起裂压裂出现陡升的趋势,超过 70° 直至 90° 范围内的起裂压力变化幅度较小,由于裂缝延伸遵循最小能量原理,裂缝总是向着阻力最小的方向延伸。由于最大水平主应力方向的破裂阻力最小,裂缝起裂后在该方向上所需要的能量最小,破裂压力也最小,因此最大水平主应力方向即为最佳的钻孔方向。根据起裂压力和方位角的函数关系,方位角为 40° 时为实现低起裂压力的临界方位角,可以根据地应力的分布通过控制钻孔方位实现降低破裂压力的目的。

2.3 水力径向钻孔孔径

水力径向钻孔孔眼直径是钻孔设计的一个重要参数,涉及喷头尺寸的选择。以现有的工艺技术水平为例进行计算,计算中选取不同钻孔孔眼直径得到钻孔井眼处应力分布和起裂压力见图 6、7。

随着孔眼直径增加,起裂压力呈明显的线性降

低趋势,孔眼直径在 50 mm 左右时,起裂压力较 30 mm 的降低接近 17 MPa。从降低起裂压力的角度分析,选择大孔径的喷射工具较为合理。影响径向钻孔破裂压力的主要钻孔参数是钻孔孔径与钻孔方位角,钻孔孔径越大,破裂压力越小,变化规律呈线性,地层破裂压力随着射孔方位角的增加而增大。破裂压力随钻孔长度的增加基本保持不变,要降低地层的破裂压力,应适当增加钻孔孔径,此外将射孔方位角限制在 40° 以内。

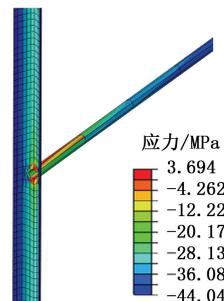


图 6 单径向钻孔井眼及钻孔剖面应力分布
Fig. 6 Single radial drilling hole and drilling section stress distribution

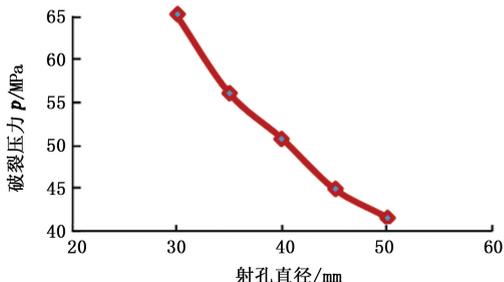


图 7 孔眼直径与起裂压力关系
Fig. 7 Relations between hole diameter and crack pressure

3 水力径向射流压裂裂缝延伸

3.1 扩展有限元模型建立

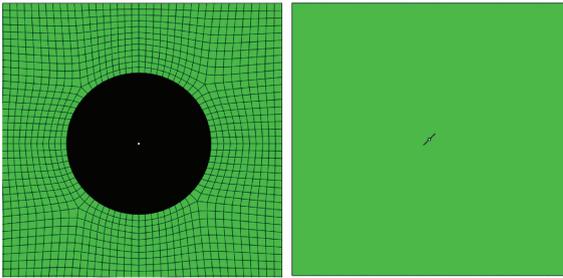
基于扩展有限元法(XFEM)进行压裂流体注入过程(结合流-固耦合法)的模拟。在不同钻孔方位角的影响下,裂缝转向的过程发生在近井筒附近。在建立裂缝扩展有限元模型中考虑近井筒地带的裂缝偏转问题。

3.1.1 力学模型建立

利用 Abaqus 有限元软件建立扩展有限元二维模型,见图 8。基体尺寸为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$,井筒直径为 179.3 mm,井筒两侧的地层范围远超过井筒直径,经过试算,同样条件下增大计算区域的范围对计算结果无影响。

作用在模型上的载荷及边界条件(图 9):①作

用在地层内部的初始地应力场水平最大、最小主应力;②模型外边界施加的X、Y方向为零的位移约束;③模型外边界施加的孔隙边界;④作用在地层内部的初始孔隙比。



(a) 显示网格 (b) 不显示网格

图8 45°钻孔方位角扩展模型

Fig. 8 45° perforation azimuth extension model

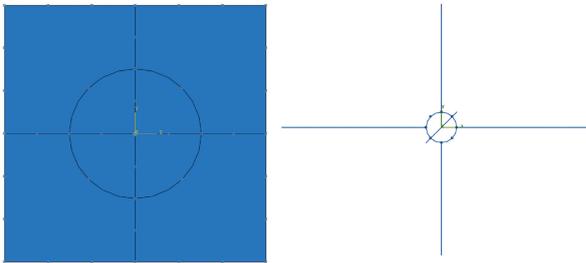


图9 45°钻孔方位角扩展有限元约束条件

Fig. 9 45° perforation azimuth extended finite element constraints

扩展有限元计算模型的材料参数:储层弹性模量、储层抗拉强度、施工排量、水平最小应力、储层泊松比、孔隙度、储层渗透率和水平最大应力分别为35 GPa、3.5 MPa、3 m³·min⁻¹、35 MPa、0.265、0.18、1.5×10⁻³ μm²和40 MPa。

3.1.2 扩展有限元扩展准则

在图9的扩展中,首先假定裂缝在扩展过程中其前缘形态不随之变化,即裂缝的张开尺寸在扩展前后是不变的。用等效应变能量释放率 G_{equiv} 表示。

$$f = \frac{G_{equiv}}{G_{equivC}} \geq 1.0 \quad (2)$$

G_{equiv} 包含3种裂缝能量释放率,在ABAQUS中,对 G_{equiv} 的计算有3种方法,包括BK法、Power law方法和Reeder law法,本文中选用BK法的能量准则计算裂缝扩展。BK法如下:

$$G_{equivC} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \quad (3)$$

3.2 钻孔方位角对裂缝扩展影响

通过将初始损伤单元旋转不同角度,建立不同钻孔角条件下的扩展有限元模型。模拟计算径向深穿透钻孔方向与最大主应力夹角在10°、30°、60°、75°时,不同水平最大、最小主应力差值对压裂裂缝起裂扩展方向的影响,见图10~13。

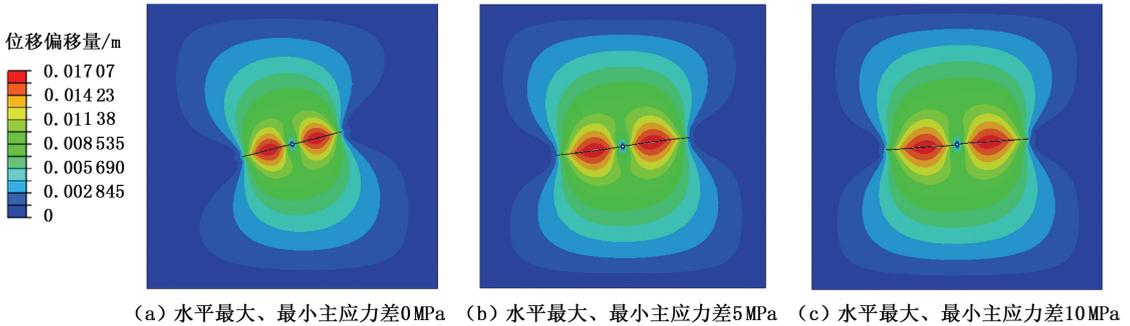


图10 10°钻孔方位角扩展图

Fig. 10 Figure of 10° perforation azimuth extension

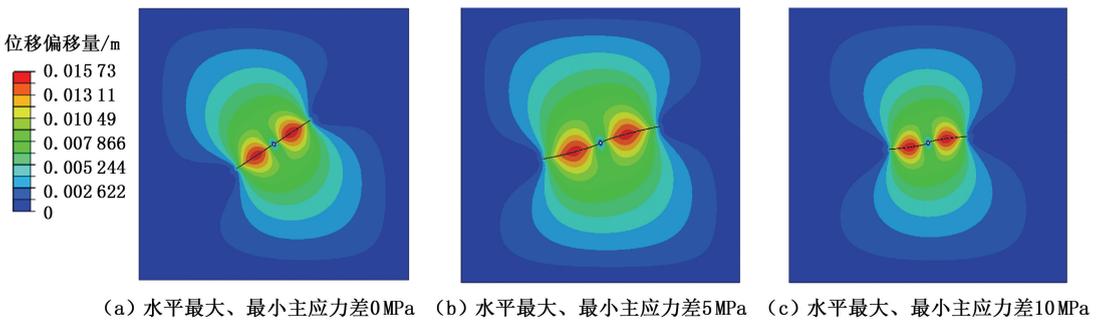


图11 30°钻孔方位角扩展图

Fig. 11 Figure of 30° perforation azimuth extension

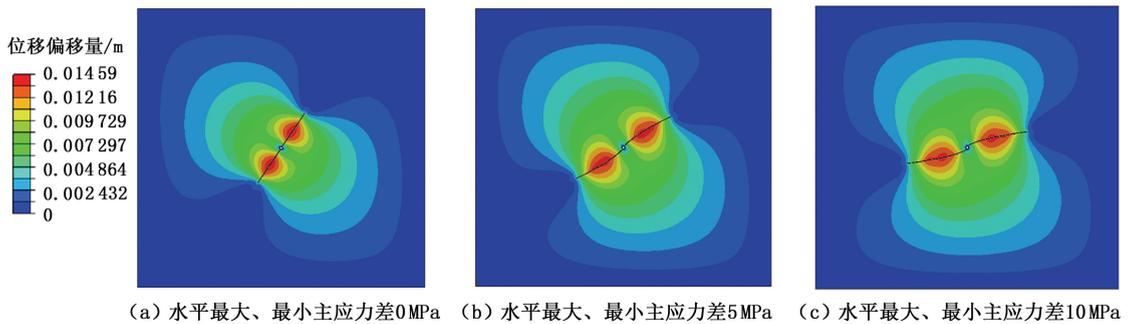


图12 60°钻孔方位角扩展图

Fig. 12 Figure of 60° perforation azimuth extension

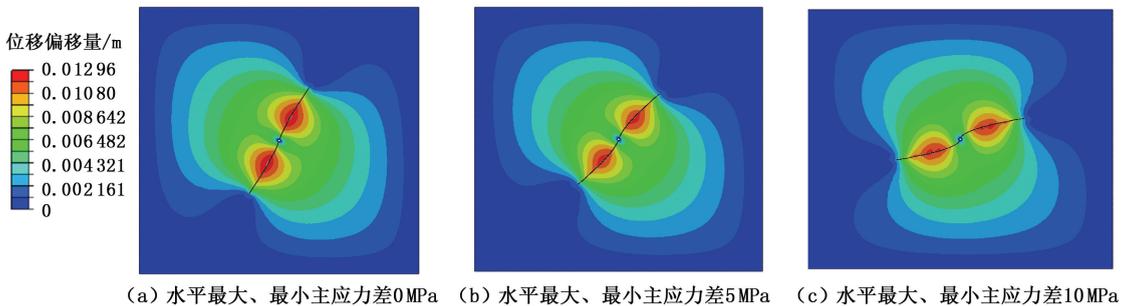


图13 75°钻孔方位角扩展图

Fig. 13 Figure of 75° perforation azimuth extension

由图10~13可知,裂缝偏转角度随钻孔方向与最大主应力夹角的增大而增加,在钻孔夹角为0~20°时,裂缝偏转至最大主应力方向较为容易。在低应力差(0~5 MPa)时,裂缝基本没有偏转或偏转不明显,径向钻孔可以实现定向作用,在高应力差(8~10 MPa)条件下,裂缝偏转明显,最终转向至最大主应力方向。

4 结论

(1)影响径向钻孔破裂压力的主要钻孔参数是钻孔孔径与方位角。钻孔孔径越大,破裂压力越小,变化规律呈线性变化,选择大孔径的喷射工具较为合理。破裂压力随着钻孔方位角的增加而增大,当钻孔方位角与最大主应力方向夹角在40°以内时,起裂压力变化不明显,当处于40°~70°时,起裂压力呈陡升的趋势,处于70°~90°范围内起裂压力变化幅度不大,40°时为低起裂压力的临界方位角,当钻孔方向与最大水平地应力重合时,起裂压力最小。

(2)裂缝偏转角度随钻孔方向与最大主应力夹角的增大而增加。在钻孔夹角为0~20°时,裂缝偏转至最大主应力方向较为容易。在低应力差(0~5 MPa)的条件下裂缝基本无偏转或偏转不明显,径向钻孔可以实现任意方向上的导向作用。在高应力差(8~10 MPa)条件下,裂缝偏转明显,最终转向至最

大主应力方向。

参考文献:

- [1] 苏建. 水力喷射定向深穿透压裂技术研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2014, 27(2): 55-58.
SU Jian. Study on hydraulic jet directional deep penetrating fracturing technology[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2014, 27(2): 55-58.
- [2] 王青川, 王义国, 黄建强, 等. 水力喷射定向钻孔技术实践与认识[J]. 油气井测试, 2010, 19(3): 54-57.
WANG Qingchuan, WANG Yiguo, HUANG Jianqiang, et al. The practice and understanding of hydraulic jet directional drilling technology [J]. Well Testing, 2010, 19(3): 54-57.
- [3] MARCELO A B, JOSE H B, GUILLERMO D S. Radial drilling in Argentina: Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, April 15-18, 2007 [C]. Argentina: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [4] RAUL A C, JUAN F T B. First experience in the application of radial perforation technology in deep wells: Latin American & Caribbean Petroleum Engineering Conference, Buenos Aires, April 15-18, 2007 [C]. Argentina: Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [5] 王素玲, 董康兴, 董海洋. 低渗透储层射孔对起裂压力的影响[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(3): 85-89.

- WANG Suling, DONG Kangxing, DONG Haiyang. Low permeability reservoir perforation effect on crack pressure [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2009, 31(3):85-89.
- [6] 陈峥嵘, 邓金根, 朱海燕, 等. 定向射孔压裂起裂与射孔优化设计方法研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(8):2309-2315.
- CHEN Zhengrong, DENG Jingen, ZHU Haiyan, et al. Oriented perforation fracturing crack and perforating optimization design method research [J]. *Rock Mechanics*, 2013, 34(8):2309-2315.
- [7] 邓金根, 郭先敏, 孙焱, 等. 致密气藏压裂井定向射孔优化技术[J]. *石油钻采工艺*, 2008, 30(6):93-96.
- DENG Jingen, GUO Xianmin, SUN Yan, et al. Tight gas wells oriented perforating optimization techniques [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2008, 30(6):93-96.
- [8] 文贤利. 水力喷射压裂裂缝起裂与扩展规律研究[D]. 西安:西安石油大学, 2011.
- WEN Xianli. Study on the fracture initiation and growth laws of hydraulic jet fracturing[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2011.
- [9] 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. The study of the influence of perforation of formation fracture pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(1):40-41.
- [10] 彪仿俊, 刘合, 王秀喜, 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, WANG Xiuxi, et al. Study on the numerical simulation of the spiral perforation under the conditions of formation fracture pressure [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2011, 41(3):219-226.
- [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, WEI Baohua, WANG Jinfeng, et al. Improve the efficiency of hydraulic fracturing of low permeability oil reservoirs of directional perforation simulation test study [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2003, 31(5):14-16.
- [12] 姜浒, 陈勉, 张广清, 等. 定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(7):1321-1326.
- JIANG Hu, CHEN Mian, ZHANG Guangqing, et al. Oriented perforating effects on hydraulic fracture crack and extension [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7):1321-1326.

(编辑 沈玉英)