◀油气开采▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.04.015

射孔水平井分段压裂起裂压力理论研究

吕志凯[1],何顺利[1],罗富平[2],陆红军[3],王文雄[4]

(1. 石油工程教育部重点实验室(中国石油大学(北京)),北京 102249;2. 中国中化石油勘探开发有限公司,北京 100031;3. 中国石油长庆油田分公司超低渗透研究中心,陕西西安 710061;4. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院,陕西西安 710061)

摘　要:综合考虑井筒内压、原始地应力分布、先压水力裂缝的诱导应力等因素,根据叠加原理及弹性力学理论,建立了射孔水平井分段压裂起裂压力计算模型,分析了初始及后续裂缝的起裂规律。研究结果表明,初始裂缝产生的诱导应力分布受裂缝间距影响。当初始裂缝缝长一定时,沿井筒方向诱导应力逐步降低,直至地应力场趋于原始地应力场;射孔水平井裂缝起裂受射孔方位角的影响,最佳射孔方位由井筒周围地应力分布决定;先压裂缝产生的诱导应力场会导致后续裂缝的起裂压力增大,这种影响会随着裂缝半缝长的增大而增强;半缝长一定时,起裂压力的增加幅度随着裂缝间距的增加递减。

关键词:射孔完井 水平井 分段压裂 应力场 诱导应力 起裂压力

中图分类号:TE357.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001-0890(2011)04-0072-05

Study on Hydraulic Fracture Initiation Pressure of Staged Fracturing in Perforated Horizontal Wells

Lü Zhikai[1], He Shunli[1], Luo Fuping[2], Lu Hongjun[3], Wang Wenxiong[4]

(1. *MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing*, 102249, *China*; 2. *Petroleum Exploration & Production Company, Sinochem, Beijing*, 100031, *China*; 3. *Research Center of Super-low Permeability Reservoir; Changqing Oilfield Branch, Xi' an, Shaanxi*, 710061, *China*; 4. *Oil & Gas Technology Research Institute, Changqing Oilfield Branch, Xi'an, Shaanxi*, 710061, *China*)

Abstract: Based on the superposition and elasticity theory, a theoretical model of initiation pressure calculation in staged fracturing of perforated horizontal well was developed while considering the effect of wellbore pressure, formation stress distribution, and stress induced by hydraulic fracture. The change of initial and subsequent fractures initiation was studied. The results show that the stress induced by initial fracture is influenced by fracture spacing. When the initial fracture length is constant, the induced stress along wellbore decreases gradually until the stresses reach initial formation stresses. Fracture initiation of a perforated horizontal well is affected by perforation azimuth. The optimum azimuth is determined by the stress distribution around wellbore. Induced stress can increase subsequent fractures initiation pressure. The degree of impact is increasing with the increase of fracture length. When fracture length is constant, the increase amount of initiation pressure would drop rapidly with the increase of fracture spacing.

Key words: perforated completion; horizontal well; staged fracturing; stress field; induced stress; initiation pressure

水平井分段压裂是实现低渗透油气藏高效开发的有效手段[1-3]。裂缝起裂机理的研究已成为国内外水力压裂研究领域的重要课题。水平井井筒周围地应力分布复杂,受到作业条件、压裂液渗滤性能、孔隙压力等众多因素的影响[4-6]。同时,水平井分段压裂时先压裂缝对后压裂缝的起裂也有重要的影响。

国内外学者对水平井压裂裂缝的起裂机理做了大量研究[7-10],建立了起裂压力及起裂角的计算模型,但没有考虑先压水力裂缝所产生的诱导应力影响。而进行水力压裂的水平井在工程条件上一般为射孔井,为此,笔者根据叠加原理,建立了射孔水平

收稿日期:2011-02-25;**改回日期**:2011-07-01。

作者简介:吕志凯(1984—),男,河北任丘人,2008 年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业,油气田开发工程专业在读博士研究生,主要从事油气井增产技术方面的研究工作。

联系方式:(010)89734268,lzknb@163.com。

基金项目:国家科技重大专项项目子课题"(特)低渗透油藏工程新理论与新方法"(编号:2009ZX05009-004)资助。

井分段压裂起裂压力计算模型,分析了先压裂缝诱导应力、起裂压力的影响因素及变化规律。

1　水平井筒井壁应力分布

1.1　先压裂缝诱导应力分析

为了改善压裂效果,最大限度地增加水平井产能,对水平井进行水力压裂时应尽量使其产生横向裂缝,水平井筒应与水平最小主应力方向一致[11]。对有多条横向裂缝的水平井进行分段压裂时,多条裂缝的产生存在着先后顺序。先压裂缝产生后,将导致裂缝周围一定范围内的应力分布发生改变,从而影响后续压裂水力裂缝的起裂。

以均质、各向同性的二维平面应变模型为基础,建立了水力裂缝诱导应力场几何模型[12-14],见图 1。

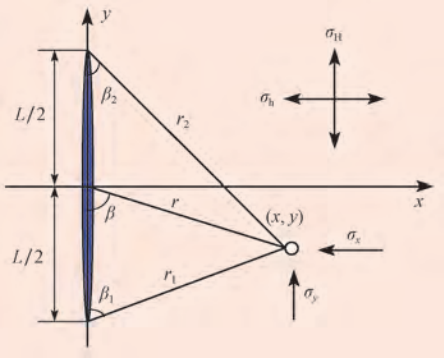

图 1　水力裂缝诱导应力场几何模型

Fig. 1　Geometric stress field induced by hydraulic fracture

模型假设裂缝形态为垂直裂缝,裂缝断面为椭圆形,半缝长为 $L/2$。以水平井井筒方向(最小水平主应力方向)为 x 轴,以裂缝缝长方向(最大水平主应力方向)为 y 轴。取拉应力为正,压应力为负。在图 1 所示坐标系中,现有水力裂缝在点(x,y)处的诱导应力分量为:

$$\begin{cases}\sigma_{ax}=p\dfrac{r}{d}\left(\dfrac{d^2}{r_1r_2}\right)^{\frac{3}{2}}\sin\beta\sin\dfrac{3}{2}(\beta_1+\beta_2)+\\ \qquad p\left[\dfrac{r}{(r_1r_2)^{\frac{1}{2}}}\cos\left(\beta-\dfrac{1}{2}\beta_1-\dfrac{1}{2}\beta_2\right)-1\right]\\ \sigma_{ay}=-p\dfrac{r}{d}\left(\dfrac{d^2}{r_1r_2}\right)^{\frac{3}{2}}\sin\beta\sin\dfrac{3}{2}(\beta_1+\beta_2)+\\ \qquad p\left[\dfrac{r}{(r_1r_2)^{\frac{1}{2}}}\cos\left(\beta-\dfrac{1}{2}\beta_1-\dfrac{1}{2}\beta_2\right)-1\right]\\ \sigma_{az}=\nu(\sigma_{ax}+\sigma_{ay})\\ \tau_{axy}=p\dfrac{r}{d}\left(\dfrac{d^2}{r_1r_2}\right)^{\frac{3}{2}}\sin\beta\cos\dfrac{3}{2}(\beta_1+\beta_2)\end{cases}\tag{1}$$

式中:σ_{ax},σ_{ay},σ_{az} 和 τ_{axy} 为现有裂缝在地层产生的诱导应力分量,MPa;p 为现有裂缝内部压力,MPa;L 为缝长,m;d 为半缝长,$d=L/2$,m;ν 为岩石泊松比;$r=\sqrt{x^2+y^2}$;$r_1=\sqrt{x^2+(y+d)^2}$;$r_2=\sqrt{x^2+(y-d)^2}$;$\beta=\arctan(-x/y)$;$\beta_1=\arctan[-x/(y+d)]$;$\beta_2=\arctan[x/(d-y)]$。

1.2　复合地应力分析

先压裂缝形成后井壁附近的应力场由原始地应力场(最大水平主应力 σ_H、最小水平主应力 σ_h 和垂向上覆地层应力 σ_v)和现有水力裂缝产生的诱导应力场共同作用构成,见图 2。

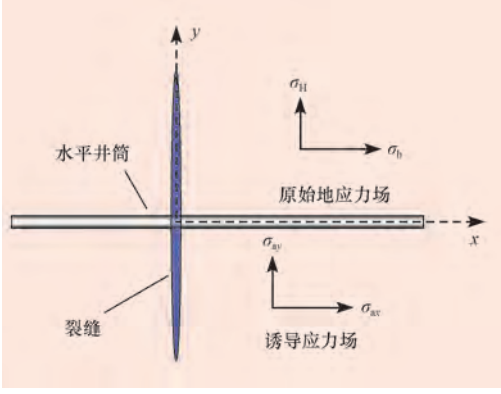

图 2　考虑裂缝诱导应力下的地应力分布模型示意

Fig. 2　The formation stress distribution considering induced stress

根据叠加原理,初始裂缝产生后的地应力分量为:

$$\begin{cases}\sigma'_H=\sigma_H+\sigma_{ay}\\ \sigma'_h=\sigma_h+\sigma_{ax}\\ \sigma'_v=\sigma_v+\nu(\sigma_{ax}+\sigma_{ay})\end{cases}\tag{2}$$

式中:σ_H,σ_h,σ_v 为地层原始应力分量,MPa;σ'_H,σ'_h,σ'_v为地层复合应力分量,MPa。

1.3　射孔水平井井壁处应力分布

在目的层段射孔,可以在注入压裂液后的孔眼位置形成应力集中带,进而有效降低压裂施工的压力[15]。假设射孔孔眼为一个小尺寸裸眼水平井,井筒和射孔孔眼内的流体压力相同,射孔孔眼与井筒正交。射孔井筒几何模型及应力重新分布[5]如图 3 所示。

由于套管的存在,可忽略水平井筒内的压裂液滤失。由应力叠加原理得射孔井筒周围应力分布为:

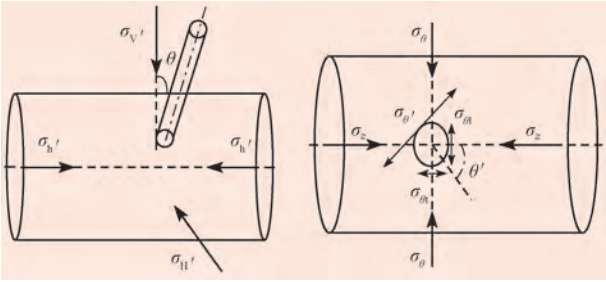

图 3 射孔水平井筒及射孔孔眼应力分布模型示意

Fig. 3 Stress distribution around horizontal wellbore and perforation

$$\begin{cases}\sigma_r = -p_w \\ \sigma_{\theta'} = 2p_w(1+\cos 2\theta') + (\sigma'_v + \sigma'_H + \sigma_z) + \\ \qquad 2(\sigma'_v + \sigma'_H - \sigma_z)\cos 2\theta' - \\ \qquad 2(\sigma'_v - \sigma'_H)\cos 2\theta(1+2\cos 2\theta') \\ \sigma_z = cp_w + \sigma'_h - 2\nu\cos 2\theta(\sigma'_v - \sigma'_H) \\ \tau_{r\theta} = \tau_{z\theta} = \tau_{rz} = 0\end{cases} \tag{3}$$

式中：σ_r 为井筒径向应力，MPa；$\sigma_{\theta'}$ 为孔眼切向应力，MPa；σ_z 为井筒轴向应力，MPa；$\tau_{r\theta}$，$\tau_{\theta z}$ 和 τ_{rz} 为井壁处的剪应力分量，MPa；p_w 为井筒内压裂液压力，MPa；θ' 为裂缝起裂方位角，(°)；θ 为射孔方位角，(°)；c 为沿井筒方向的压力修正系数。

2 总应力下的裂缝起裂分析

2.1 裂缝起裂准则

根据岩石拉伸破裂准则，当岩石受到的拉伸应力达到岩石的抗拉强度时，岩石材料将发生初始破裂。根据弹性力学理论，最大拉应力为[16]：

$$\sigma_{\max}(\theta') = \frac{\sigma_{\theta'} + \sigma_z}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_{\theta'} - \sigma_z)^2 + 4\tau_{\theta z}^2} \tag{4}$$

式中，$\sigma_{\max}(\theta')$ 为最大拉应力，MPa。

对于某一射孔方位角 θ，可求得井壁上发生拉伸破裂时的裂缝起裂方位角。

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_{\max}(\theta')}{\mathrm{d}\theta'} = 0 \tag{5}$$

当井壁处 z-θ' 平面上的最大有效拉伸应力不小于岩石抗拉强度 σ_t 时，井壁处岩石开始发生断裂，即：

$$\sigma_{\max}(\theta') - \eta p_0 \geqslant \sigma_t \tag{6}$$

式中：η 为地层孔隙压力贡献系数；p_0 为地层孔隙流体压力，MPa；σ_t 为地层岩石抗拉强度，MPa。

2.2 射孔水平井起裂压力分析

如图 3 所示，$\sigma_{\theta 1}$，$\sigma_{\theta t}$ 分别为起裂方位角 θ' 为 0°和 90°时孔眼根部的切向应力。显然，$\sigma_{\theta 1}$ 为使裂缝起裂的最大拉伸应力[6]。

$$\sigma_{\theta 1} = (4-c)p_w + (3+6\cos 2\theta)\sigma'_H + (3-6\cos 2\theta)\sigma'_v - \sigma'_h + 2\nu(\sigma'_v - \sigma'_H) \tag{7}$$

在 $\theta=0°$ 和 $\theta=90°$ 处射孔，裂缝起裂压力分别为 p_{w0} 和 p_{w90}。

$$\begin{cases} p_{w0} = \dfrac{9\sigma'_H - 3\sigma'_v - \sigma'_h + 2\nu(\sigma'_v - \sigma'_H) - \eta p_0 - \sigma_t}{c-4} \\ p_{w90} = \dfrac{9\sigma'_v - 3\sigma'_H - \sigma'_h - 2\nu(\sigma'_v - \sigma'_H) - \eta p_0 - \sigma_t}{c-4} \end{cases} \tag{8}$$

实际起裂压力为：

$$p_{wp} = \min(p_{w0}, p_{w90}) \tag{9}$$

式中：p_{wp} 为起裂压力，MPa；p_{w0} 为在 $\theta=0°$ 处射孔的起裂压力，MPa；p_{w90} 为在 $\theta=90°$ 处射孔的起裂压力，MPa。

3 实例计算及分析

选取长庆油田某区块的实际参数进行对比分析。具体参数为：$\sigma_H=-30$ MPa，$\sigma_h=-19$ MPa，$\sigma_v=-42$ MPa，$p_w=50$ MPa，$p_0=16.5$ MPa，$c=0.95$，$\nu=0.27$，$\eta=1$。

3.1 诱导应力的变化规律

取缝长 $L=100$ m，计算了距先压裂缝一段距离内井壁处($y=0.05$ m)的诱导应力分布情况，结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，距离先压裂缝 0～150 m 时，先压裂缝产生的诱导应力较大，会对井筒周围地应力分布产生较大影响，在压裂施工作业上表现为异常破裂压力曲线；在裂缝延伸时会改变裂缝形态，形成不规则裂缝。距离先压裂缝大于 150 m 时，先压裂缝诱导应力逐渐变小，地应力趋近于原始地应力。

3.2 裂缝起裂规律

根据式(7)求得了孔眼根部最大拉应力 $\sigma_{\theta 1}$ 与射孔方位角的关系曲线，见图 5。从图 5 可以看出：$\sigma_{\theta 1}$ 随射孔方位角 θ 以 π 为周期变化，在 $\theta=0°$ 处拉应力

达到最大，最有利于裂缝起裂；在 $\theta=90^\circ$时最小，最不利于裂缝起裂，最佳射孔方位角为 0°。

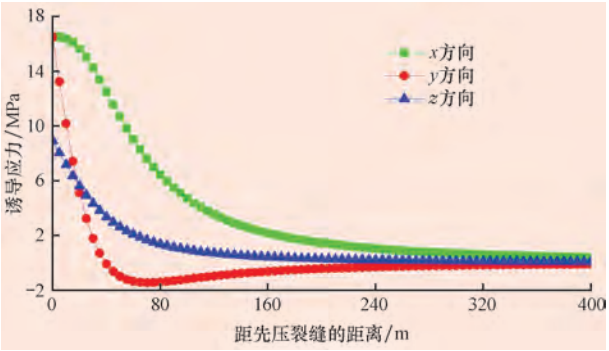

图 4　诱导应力在 x，y 和 z 方向的变化曲线

Fig. 4　Variation of induced stress in x, y and z direction

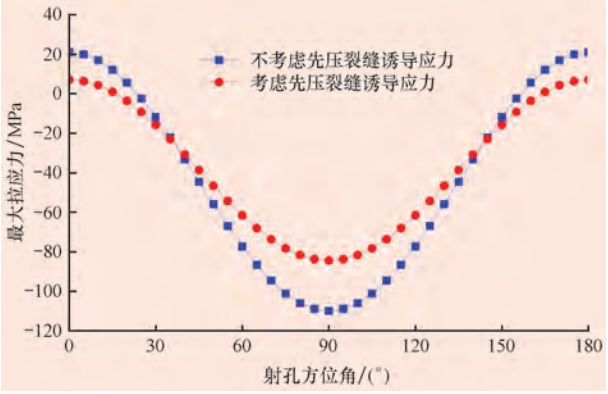

图 5　最大拉应力与射孔方位角关系曲线

Fig. 5　Relationship between maximum tensile stress and azimuth of perforation

同时，从图 5 也可以看出，在最佳射孔方位角处，考虑先压裂缝诱导应力下孔眼根部产生的最大拉应力比不考虑先压裂缝诱导应力时小，说明先压裂缝形成后会导致后续裂缝起裂压力增大。

3.3　后续裂缝起裂压力变化特征

取半缝长为 100，150 和 200 m，分别计算考虑诱导应力场时的起裂压力与无诱导应力场时的起裂压力，并进行对比分析，结果见图 6。

从图 6 可看出：先压裂缝产生的诱导应力场会导致后续裂缝的起裂压力增大，这种影响程度会随着裂缝半缝长的增大而增大；半缝长一定时，起裂压力的增加幅度随着裂缝间距的增大而减小，当裂缝间距增加到 160 m 以上时，先压裂缝产生的诱导应力对后续裂缝起裂压力的影响十分微弱。因此在分段压裂时，应尽量增大裂缝间距，以减小先压裂缝对压裂施工作业的不利影响。

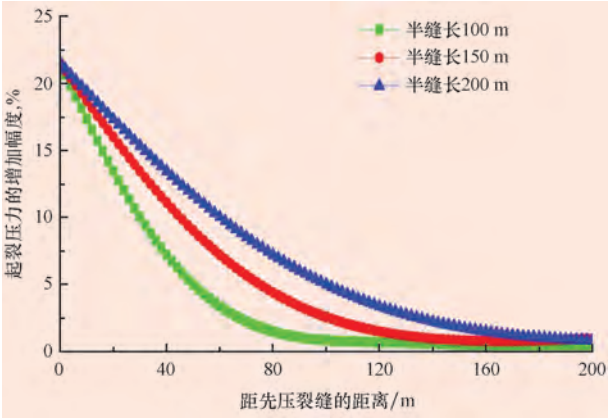

图 6　沿井筒方向考虑诱导应力场时的起裂压力与无诱导应力场时的起裂压力的比值变化

Fig. 6　Variation of initiation pressure along wellbore direction

4　结　论

1）影响射孔水平井分段压裂起裂压力的主要因素包括井筒内压裂液压力、原始地应力分布、先压裂缝诱导应力及射孔方位角等，综合考虑以上因素建立了起裂压力计算数学模型。

2）先压裂缝产生的诱导应力分布受裂缝内压、裂缝缝长和裂缝间距的影响。当先压裂缝缝长一定时，沿井筒方向诱导应力逐步降低，直至地应力场趋于原始地应力场。

3）射孔水平井裂缝起裂受射孔方位角的影响，最佳射孔方位角由井筒周围地应力分布决定，在文中地应力场下的最佳射孔方位角为 0°。

4）先压裂缝产生的诱导应力场会导致后续裂缝的起裂压力增大，这种影响会随着裂缝半缝长的增大而增大。半缝长一定时，起裂压力的增加幅度随着裂缝间距的增大而减小。

参　考　文　献

[1]　唐汝众，温庆志，苏建，等. 水平井分段压裂产能影响因素研究[J]. 石油钻探技术，2010，38(2)：80-83.
Tang Ruzhong, Wen Qingzhi, Su Jian, et al. Factors affecting productivity of stage fractured horizontal well[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(2): 80-83.

[2]　袁帅，李春兰，曾保全，等. 压裂水平井裂缝参数优化实验[J]. 石油钻探技术，2010，38(4)：99-103.
Yuan Shuai, Li Chunlan, Zeng Baoquan, et al. Experimental study on optimization of fracture parameters in horizontal well fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 99-103.

[3] 姜涛，巩小雄，肖林鹏. 水平井分段压裂技术在牛圈湖油田的应用[J]. 石油钻采工艺，2009，31(2)：101-104.
Jiang Tao，Gong Xiaoxiong，Xiao Linpeng. Application for stepwise fracturing technology of horizontal well in Niujuanhu Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology，2009，31(2)：101-104.

[4] 黄荣樽，白家祉，周煜辉，等. 大斜度井围岩应力和位移的粘弹性分析[J]. 石油钻采工艺，1994，16 (5)：1-7.
Huang Rongzun，Bai Jiazhi，Zhou Yuhui，et al. The analysis of rock stress and displacement of the surrounding wall of inclined wellbore[J]. Oil Drilling & Production Technology，1994，16 (5)：1-7.

[5] 邓燕. 重复压裂造新缝力学机理研究[D]. 成都：西南石油学院石油工程学院，2005.
Deng Yan. Research on mechanism of inducing new fractures for refracturing[D]. Chengdu：Southwest Petroleum Institute，College of Petroleum Engineering，2005.

[6] Hossain M M，Rahman M K，Sheik Rahman. Hydraulic fracture initiation and propagation：roles of wellbore trajectory，perforation and stress regimes[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2000，27(3/4)：129-149.

[7] Hossain M M. A comprehensive monograph for hydraulic fracture initiation from deviated wellbores under arbitrary stress regimes[R]. SPE 54360，1999.

[8] 周代余，郭建春，赵金洲，等. 裸眼完井下的大位移井裂缝起裂研究[J]. 西南石油学院学报，2002，24(6)：32-35.
Zhou Daiyu，Guo Jianchun，Zhao Jinzhou，et al. Study of fracture initiation of the extended reach wells with open hole completion[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute，2002，24 (6)：32-35.

[9] 尚希涛，何顺利，刘广峰，等. 水平井分段压裂破裂压力计算[J]. 石油钻采工艺，2009，31(2)：96-100.
Shang Xitao，He Shunli，Liu Guangfeng，et al. Breakdown pressure calculation of staged fracturing for horizontal wells[J]. Oil Drilling & Production Technology，2009，31(2)：96-100.

[10] 王培义，李宗田，季龙华. 水平井压裂裂缝形成机理初探与应用[J]. 石油天然气学报，2008，30(1)：148-150.
Wang Peiyi，Li Zongtian，Ji Longhua. Mechanism of horizontal well hydraulic fracturing and its application[J]. Journal of Oil and Gas Technology，2008，30(1)：148-150.

[11] 张学文，方宏长，裘怿楠，等. 低渗透率油藏压裂水平井产能影响因素[J]. 石油学报，1999，20(4)：51-55.
Zhang Xuewen，Fang Hongchang，Qiu Yinan，et al. A study on factors affecting the performance of hydraulically fractured horizontal well in low permeability reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica，1999，20(4)：51-55.

[12] Warpinski N R，Branagan P T. Altered-stress fracturing[J]. Journal of Petroleum Technology，1989，41(9)：990-997.

[13] Palmer I D. Induced stresses due to propped hydraulic fracture in coalbed methane wells[R]. SPE 25861，1993.

[14] 程远方，王桂华，王瑞和. 水平井水力压裂增产技术中的岩石力学问题[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(14)：2463-2466.
Cheng Yuanfang，Wang Guihua，Wang Ruihe. Rock mechanics problems in horizontal well fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2004，23(14)：2463-2466.

[15] 陈作，王振铎，郑伟，等. 水力喷砂分段压裂优化设计与施工[J]. 石油钻采工艺，2010，32(3)：72-75.
Chen Zuo，Wang Zhenduo，Zheng Wei，et al. Hydraulic sand blasting segregated fracturing optimization and operation technology[J]. Oil Drilling & Production Technology，2010，32(3)：72-75.

[16] 李兆敏，蔡文斌，张琪，等. 水平井压裂裂缝起裂及裂缝延伸规律研究[J]. 西安石油大学学报：自然科学版，2008，23(5)：46-48.
Li Zhaomin，Cai Wenbin，Zhang Qi，et al. Study on the initiation and propagation laws of the fractures in horizontal well fracturing[J]. Journal of Xi'an Shiyou University：Natural Science Edition，2008，23(5)：46-52.

《石油钻探技术》期刊实施优先数字出版

“优先数字出版”是指文章在正式印刷出版前，以数字出版方式提前出版印刷版期刊内容，在网络上优先发表的正式出版形式，通常比印刷出版提前数周或几个月。“优先数字出版”改变了学术期刊传统纸质印刷版滞后的局面，对于加速知识传播，促进科技创新、推广应用和期刊自身发展具有重要意义。

近年来，国际上学术期刊优先数字出版发展迅速，已经得到期刊界认可并纷纷采用。如 Science 的 Express，Nature 的 AOP(Advance Online Publication)等。国内“中国知网”〔由新闻出版总署批准的中国学术期刊(光盘版)电子杂志社主办，互联网出版许可证号：新出网证(京)字 008 号〕推出了学术期刊优先数字出版平台。

为加速优质稿件发表速度与传播速度，促进学术成果在国内外学术界的认可、传播和利用，《石油钻探技术》编辑部与“中国知网”合作，每期将优选 5～10 篇稿件，实施优先数字出版。对于优先出版的稿件，作者需签署优先数字出版授权书。

欢迎广大读者作者踊跃投稿！

《石油钻探技术》编辑部