DOI: 10.11883/1001-1455(2016)02-0224-06

低渗透油藏爆炸压裂产能分析及压裂改造区域优化设计*

刘静华[1],韩国庆[1],景紫岩[2]

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院,北京 102249;
2. 中国石油勘探开发研究院西北分院,甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于爆炸压裂裂缝分布规律,提出爆炸压裂缝网双重介质复合流动产能模型,应用 Laplace 变换 Stehfest 数值反演,得到了定压条件下封闭外边界低渗透油藏爆炸压裂生产井产能表达式。在模型正确性验证的基础上结合某低渗透油藏储层特征参数研究了爆炸压裂改造区域参数对封闭边界油藏产量的影响,同时对爆炸压裂改造改造体积优化设计进行了研究。研究结果表明,爆炸压裂改造区域半径主要影响生产中期产能,改造区域渗透率对生产早期和中期影响比较大,且对于实例油藏爆炸压裂改造比为 0.1 时效果最好。

关键词: 爆炸力学;爆炸压裂;复合流动模型;改造区域半径;优化设计;低渗透油藏

中图分类号: O383;TE122.1 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**: A

我国低渗透油藏资源丰富,此类油藏储层孔隙吼道发育较差[1],需采用增产改造措施改善低渗储层物性以达到经济有效开发的目的[2-3]。传统水力压裂技术能在一定程度上改善油层渗流能力,但受储层物性和注水开发的限制水力压裂裂缝长度通常较短[4-7]。爆炸压裂技术是一种非常规压裂技术,利用爆炸产生的冲击波,冲击井壁岩石,制造裂缝,爆生气体进入裂缝并进一步扩展裂缝,达到改善低渗透储层物性、提高油藏采收率的目的[8-11]。学者们从理论和试验等 2 个方面对爆炸压裂后裂缝分布规律进行研究[10,12-13],结果表明爆炸近区压裂裂缝分布较为复杂,爆炸点较远处储层基本不受影响。目前储层产能模型主要基于双重或单重介质模型,无法准确反映爆炸压裂储层改造特征,因而适合于爆炸压裂渗流机理及产能预测模型方面的理论研究较少[14]。本文中在双重介质模型的基础上,结合爆炸压裂储层改造区域的特征,提出爆炸压裂缝网双重介质复合流动模型,求得拉式空间内定压生产下不同边界条件时油井产量半解析解,利用反演计算得到真实空间内产量变化规律,对改造区域范围等产能影响因素进行分析及优化设计,以期为爆炸压裂优化设计提供一定的参考。

1 物理模型

根据爆炸压裂储层改造区域特征,考虑储层存在 2 个不同的区域:靠近井筒区域受爆炸压裂影响而形成众多裂缝,将该区域考虑为缝网双重介质区域;远离井筒的区域受到爆破压裂冲击波影响较小,储层基本保持原状,考虑为单重介质结构。因此可以描述复合油藏为:井位于系统中心,井径为 r_w,爆炸压裂区域记为内区,改造区域半径为 r_1;未改造区域记为外区,半径为 r_e,如图 1 所示。

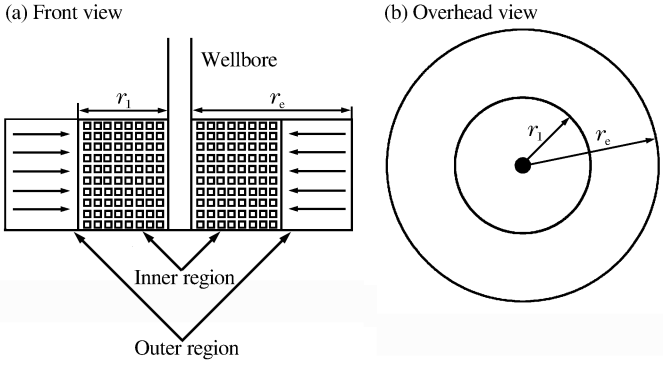

图 1 爆炸压裂物理模型示意图

Fig. 1 Physical model of explosive fracturing well

* **收稿日期**: 2014-08-28; **修回日期**: 2014-11-26

第一作者: 刘静华(1989—),女,硕士研究生,liujinghua0810@163.com。

2　数学模型

2.1　模型建立与求解

在厚度为 h、原始地层压力为 p_i 的径向圆形系统地层中，从 $t=0$ 时刻起有一口井定产量生产，那么储层内压力 $p(r,t)$ 满足下列定解问题。

内区：$r_w \leqslant r \leqslant r_1$

$$\frac{k_1^{(f)}}{\mu}\left(\frac{\partial^2 p_1^{(f)}}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p_1^{(f)}}{\partial r}\right)+\frac{\alpha k_1^{(m)}}{\mu}(p_1^{(m)}-p_1^{(f)})=\phi_1^{(f)}C_1^{(f)}\frac{\partial p_1^{(f)}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\phi_1^{(m)}C_1^{(m)}\frac{\partial p_1^{(m)}}{\partial t}+\frac{\alpha k_1^{(m)}}{\mu}(p_1^{(m)}-p_1^{(f)})=0 \tag{2}$$

式中：$k_1^{(f)}$ 为内区缝网双重介质区域裂缝渗透率，10^{-3} μm^2；μ 为原油黏度，mPa·s；$p_1^{(f)}$ 为内区裂缝压力，0.1 MPa；r 为距离井筒半径，cm；α 为基质形状因子[15]，cm^{-2}；$k_1^{(m)}$ 为内区缝网双重介质区域基质渗透率，10^{-3} μm^2；$p_1^{(m)}$ 为内区基质压力，0.1 MPa；ϕ 为孔隙度；C_1 内区储层综合压缩系数，0.1 MPa^{-1}；上标 m 代表缝网双重介质区域基质部分，上标 f 代表缝网双重介质区域裂缝部分，下标 1 表示内区储层。

外区：$r_1 < r \leqslant r_e$

$$\frac{\partial^2 p_2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial p_2}{\partial r}=\frac{\phi_2\mu C_2}{k_2}\frac{\partial p_2}{\partial t} \tag{3}$$

式中：p_2 为外区储层压力，0.1 MPa；ϕ_2 为外区储层孔隙度；C_2 为外区综合压缩系数，0.1 MPa^{-1}；k_2 为外区储层渗透率，10^{-3} μm^2；下标 2 代表外区储层。

假设该油藏定产生产，外边界封闭，结合边界条件对上式进行量纲一化和 Laplace 变换，并求解，可得出不考虑井筒存储和表皮效应时井底压力表达式：

$$\bar{p}_{w,D}=\frac{A}{E}I_0\sqrt{\frac{s\omega(1-\omega)+\lambda}{s(1-\omega)+\lambda}s}+\frac{B}{E}K_0\sqrt{\frac{s\omega(1-\omega)+\lambda}{s(1-\omega)+\lambda}s}=\frac{AI_0+BK_0}{E}\sqrt{f(s)s} \tag{4}$$

式中：$\bar{p}_{w,D}$ 为拉式空间内量纲一井底压力，$p_{w,D}=\dfrac{k_2 h(p_i-p_w)}{q_c\mu}$，其中，$p_w$ 为井底流动压力，0.1MPa；q_c 为油藏定产生产产量，cm^3/s；s 为拉式变量，ω 为储层弹性储容比，$\omega=\dfrac{\phi_1^{(f)}C_1^{(f)}}{\phi_1^{(f)}C_1^{(f)}+\phi_1^{(m)}C_1^{(m)}}$；$\lambda$ 为窜流系数，$\lambda=\dfrac{\alpha k_1^{(m)}r_w^2}{k_1^{(f)}}$；$A$、$B$、$E$、$F$ 为自定义参数，$f(s)=\dfrac{s\omega(1-\omega)+\lambda}{s(1-\omega)+\lambda}$；$r_{1,D}=r_1/r_w$ 为量纲一改造区域半径；$r_{e,D}=r_e/r_w$ 为量纲一储层半径，I、K 为贝塞尔函数。其中，

$$A=\begin{vmatrix} 0 & 0 & -\dfrac{1}{s} & -\sqrt{f(s)s}K_1(\sqrt{f(s)s}) \\ I_1(\sqrt{Fs}r_{e,D}) & -K_1(\sqrt{Fs}r_{e,D}) & 0 & 0 \\ I_0(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & K_0(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & 0 & -K_0(\sqrt{f(s)s}r_{1,D}) \\ I_1(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -K_1(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & 0 & K_1(\sqrt{f(s)s}r_{1,D})\dfrac{k_1^{(f)}\sqrt{f(s)}}{k_2\sqrt{F}} \end{vmatrix},$$

$$B=\begin{vmatrix} 0 & 0 & \sqrt{f(s)s}I_1(\sqrt{f(s)s}) & -\dfrac{1}{s} \\ I_1(\sqrt{Fs}r_{e,D}) & -K_1(\sqrt{Fs}r_{e,D}) & 0 & 0 \\ I_0(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & K_0(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -I_0(\sqrt{f(s)s}r_{1,D}) & 0 \\ I_1(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -K_1(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -I_1(\sqrt{f(s)s}r_{1,D})\dfrac{k_1^{(f)}\sqrt{f(s)}}{k_2\sqrt{F}} & 0 \end{vmatrix},\quad F=\frac{\phi_2 C_2 k_1^{(f)}}{\phi_1 C_1 k_2},$$

$$E=\begin{vmatrix} 0 & 0 & \sqrt{f(s)s}I_1(\sqrt{f(s)s}) & -\sqrt{f(s)s}K_1(\sqrt{f(s)s}) \\ I_1(\sqrt{Fs}r_{e,D}) & -K_1(\sqrt{Fs}r_{e,D}) & 0 & 0 \\ I_0(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & K_0(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -I_0(\sqrt{f(s)s}r_{1,D}) & -K_0(\sqrt{f(s)s}r_{1,D}) \\ I_1(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -K_1(\sqrt{Fs}r_{1,D}) & -I_1(\sqrt{f(s)s}r_{1,D})\dfrac{k_1^{(f)}\sqrt{f(s)}}{k_2\sqrt{F}} & K_1(\sqrt{f(s)s}r_{1,D})\dfrac{k_1^{(f)}\sqrt{f(s)}}{k_2\sqrt{F}} \end{vmatrix}。$$

A. F. V. Everdingen 等[16]给出了拉式空间内定产条件下井底流动压力和定压条件下油井产量之间的关系：

$$\bar{q}_D=\frac{1}{s^2\bar{p}_{w,D}} \tag{5}$$

式中：$\bar{q}_D$为拉式空间内量纲一日产量。

联立式(4)～(5)即可计算得到拉氏空间内油井产量，利用 Stehfest 反演计算可以得到实时域空间内的产量变化规律。对量纲一产量进行量纲化，可得到定压生产时的油井实际产量 q，单位为 t/d。

2.2 模型验证

孔祥言等[17]推导了储层为双重介质时圆形封闭储层中油井的拟稳态压力半解析解。采用的某低渗透油藏实际矿产参数为：井筒半径为 0.124 m，供给半径 250 m，基质渗透率为 0.000 23 μm^2，原油黏度为 13.5 mPa·s，基质孔隙度为 10.8%，原始地层压力为 30 MPa，原油压缩系数为 0.001 4 MPa^{-1}，井底流动压力为8 MPa，岩石压缩系数为 0.000 38 MPa^{-1}，原油密度为 0.75 g/cm^3，缝网裂缝渗透率为 0.1 μm^2。将文献[17]中模型计算结果与本文中推导得到爆炸压裂复合流动模型结果进行对比。可以看出，当 $r_1=r_e$ 即储层完全被改造时，复合流动模型与文献[17]中模型计算所得到的生产井动态数据吻合较好，但是本文中模型与之前模型相比可以考虑改造区域范围的影响，可以更准确描述储层实际改造情况。计算分析得到的爆炸压裂改造前后生产井产量对比，如图 2 所示，从图中可以看出改造区域半径对产能影响较大，对储层进行爆炸压裂改造可显著提高产量。

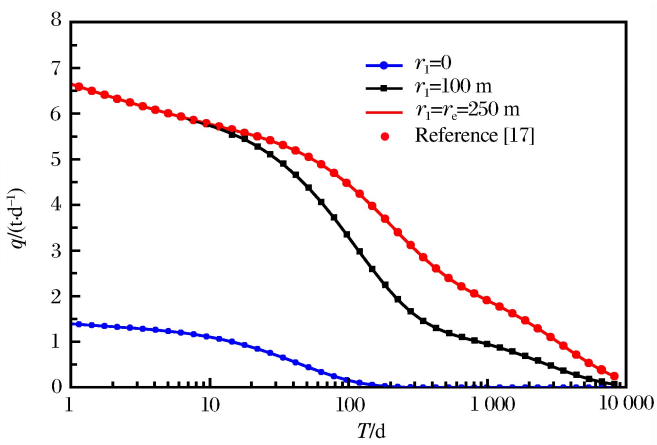

图 2 储层压裂改造前后生产井产量对比

Fig. 2 Comparison of production before and after reservoir stimulation

3 爆炸压裂产能影响因素分析

低渗透油藏储层爆炸压裂开发效果受到很多因素的影响，基于低渗透油藏爆炸压裂复合流动产能模型研究了储层改造体和改造区域渗透率对储层开发效果的影响。采用上述参数，在定井底流动压力为8 MPa下进行计算分析。

3.1 爆炸压裂改造区域半径

爆炸压裂改造半径对油井产能影响如图 3 所示。改造区域半径对产能的影响主要体现在生产中期，改造半径越大，中期产能越高。生产早期压力波及范围较小，井筒附近的改造区域向井筒供液，改造区域半径对该阶段的油井产能没有影响；生产 20 d 以后压力开始逐渐波及到边界，改造区域半径较小时产能迅速下降，改造区域半径越大，缝网双重介质区域窜流量越大，产能相应也就越高；生产约 1 000 d之后，未改造区域储层流体开始渗流，改造区域半径越大，该阶段未改造区域产能贡献度越小，因而改造区域半径对产能的影响逐渐减小。

3.2　爆炸压裂改造区域裂缝渗透率

爆炸压裂改造区域缝网双重介质渗透率对生产井产能的影响，如图 4 所示。在生产初期，渗透率对生产井产能影响很大；生产中期改造区域发生窜流，缝网区域内基质系统对产能的贡献逐渐增大，裂缝渗透率对生产井产能影响逐渐减小；生产后期渗透率对生产井产能影响很小。其主要原因在于：缝网双重介质中裂缝系统的渗透率远远大于基质系统渗透率，生产早期主要是裂缝系统内存储的流体向井筒供液，渗透率对该阶段产能影响较大；生产中期发生窜流，渗透率越大，裂缝网络系统与基质系统渗透率差异越大，系统之间流体交换越容易，生产井产能越大，该阶段基质内流体对产能贡献度较大，因而裂缝渗透率对产能的影响逐渐减小；生产后期窜流结束后，油藏表现为均质流动特征，基岩和微裂缝压力同步变化，裂缝渗透率对产能的影响很小。

4　爆炸压裂改造体积优化设计

低渗透油藏储层爆炸压裂改造过程中可以通过加大炸药量增加压裂改造区域的体积。改造区域体积越大，生产井产量就越高，但是当改造体积达到一定程度时，继续增加改造区域体积对产能的影响会越来越小，因而最大的改造区域体积并不能达到最好的经济效益。基于上述研究理论，定义压裂改造比 R 为爆炸压裂改造区域体积与油藏总体积的比值。在储层总体积不变的情况下，压裂改造比可以用于表征爆炸压裂改造区域体积的大小，压裂改造比与油井累积产量的关系如图 5 所示。当改造体积较小时，生产井累积产量受改造体积影响较大，在该阶段增加爆炸压裂改造体积可以明显的提高累积产量。当压裂改造比大于 0.1 后，继续增加改造体积时生产井产量增幅较小，因而该低渗透油藏存在最优的压裂改造比为 0.1，即爆炸压裂改造区域半径约为 25 m 时效果最好。不同储层物性对单位质量炸药的改造范围具有较大的影响，在确定最优改造半径的条件下，采用实际储层的岩石进行爆炸压裂实验以获得压裂改造范围与爆炸量用量的对应关系，进而可以得到该储层最优的炸药设计量。

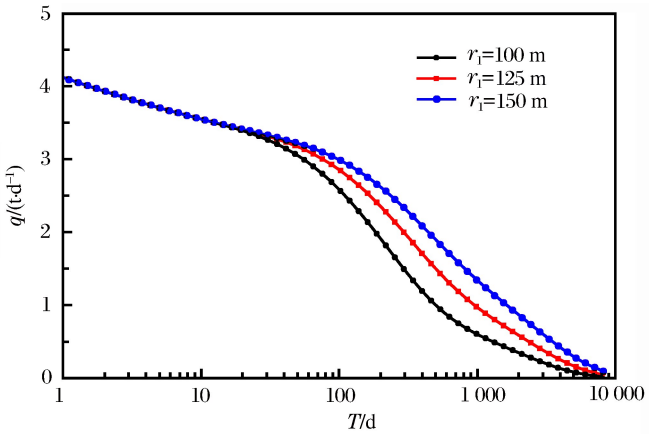

图 3　不同改造区域半径下油井日产量对比

Fig. 3　Comparison of daily production between different reservoir stimulation region radii

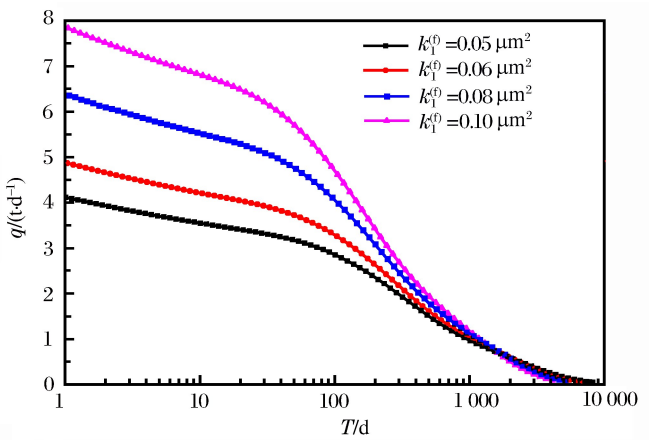

图 4　不同裂缝渗透率下油井日产量对比

Fig. 4　Comparison of daily production between different fracture permeabilities

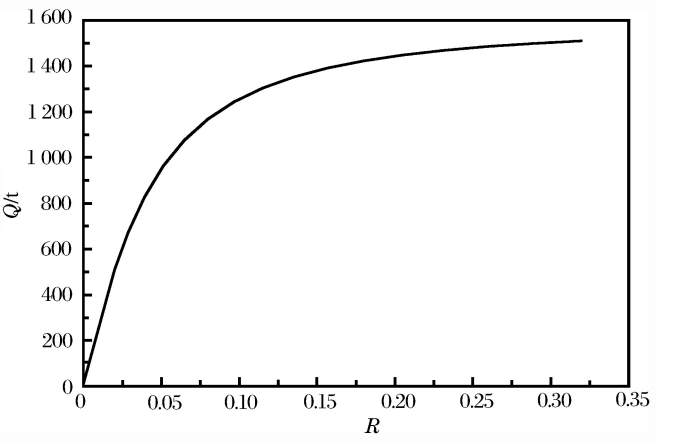

图 5　压裂改造比与累积产量的关系

Fig. 5　Relation between between accumulation production and reservoir stimulation ratios

5 结 论

在双重介质模型的基础上,结合爆炸压裂形成的裂缝分布规律,提出爆炸压裂缝网双重介质复合流动模型,求得拉式空间内定压生产时不同边界条件下生产井产能半解析解,利用反演计算得到真实空间内产量变化规律。

低渗透油藏爆炸压裂产能受压裂改造区域范围、缝网改造区域渗透率等因素影响较大;对压裂改造区域半径、缝网改造区域渗透率等因素进行分析后发现爆炸压裂改造区域半径主要影响生产中期产能,改造区域渗透率对生产早期和中期影响均比较大。

对储层实施爆炸压裂改造时存在最优的改造进行半径,计算表明,当爆炸压裂改造比为 0.1 时改造效果最好。

参考文献:

[1] 王凤琴,廖红伟,蒋峰华,等. 低渗油田注水能力下降原因分析及其对策研究[J]. 西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(1):52-55.
Wang Fengqin, Liao Hongwei, Jiang Fenghua, et al. Causes and counter measures for the descend of the water injection capacity of low permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2009,24(1):52-55.

[2] 黄荣樽. 水力压裂裂缝的起裂和扩展[J]. 石油勘探与开发,1981,8(5):62-74.
Huang Rongzun. Crack hydraulic fracturing cracks and the extension[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981,8(5):62-74.

[3] 傅尤校. 水力压裂裂缝的延伸与储层的连续性[J]. 石油学报,1984,5(2):55-62.
Fu Youxiao. Extension of fractures created by hydraurrac and continuity of reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 1984,5(2):55-62.

[4] Yew C H. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Developments in Petroleum Science, 1997,210(07):369-390.

[5] Britt L K. Optimization oil well fractures of mode rate permeability reservoir[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Las Vegas, Nevada, 1985.

[6] Shlyapobersky J K, Chudnovsky A K. Fracture mechanics in hydraulic fracturing[C]// US Symposium on Rock Mechanics. 1992.

[7] Jeffrey R G, Zhang Xi. Mechanics of Hydraulic Fracture Growth From a Borehole[C]// Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, Canada, 2010.

[8] 徐鹏,程远方,张晓春,等. 水泥试样爆炸压裂实验及裂纹分形评价[J]. 爆炸与冲击,2011,31(2):179-184.
Xu Peng, Cheng Yuanfang, Zhang Xiaochun, et al. Fractal evaluation of explosive fracturing simulation test on cement samples[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(2):179-184.

[9] 赵志红,郭建春. 层内爆炸压裂技术原理及分析[J]. 石油天然气学报,2008,30(2):297-299.
Zhao Zhihong, Guo Jianchun. Experimental study on plug removal technology with self-excited oscillation[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2008,30(2):297-299.

[10] 程远方,寇永强,徐鹏,等. 水泥试样爆炸压裂模拟试验[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(5):69-72.
Cheng Yuanfang, Kou Yongqiang, Xu Peng, et al. Explosive fracturing simulation test of cement samples[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2010,34(5):69-72.

[11] 谢贤东. 爆炸压裂后储层裂缝的渗流机理研究[D]. 北京:中国石油大学,2009.

[12] 徐鹏,程远方,刘新云,等. 低渗透油气藏爆炸压裂模拟试验及裂缝分形特征[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):636-670.
Xu Peng, Cheng Yuanfang, Liu Xinyun, et al. Explosive fracturing simulation experiment for low permeability reservoirs and fractal characteristics of cracks produced by explosive fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(5):636-670.

[13] Grady D E, Kipp M E, Smith C S. Explosive fracture studies on oil shale[J]. Society of Petroleum Engineers

Journal，1980，20(5)：349-356.

[14] Cui Mingyue，Shan Wenwen，Liang Jin，et al. In fracture explosive hydraulic fracturing fluid and its rhelogical study[C]// International Oil & Gas Conference and Exhibition in China. 2006.

[15] Brown M L，Ozkan E，Raghavan R S，et al. Practical solutions for pressure transient responses of fractured horizontal wells in unconvertional reservoirs[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering，2009，14(6)：663-676.

[16] Everdingen A F V，Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology，1949，1(12)：305-324.

[17] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，1999.

Production analysis and optimal design of explosive fracturing technology for low permeability reservoir

Liu Jinghua[1]，Han Guoqing[1]，Jing Ziyan[2]

(1. *College of Petroleum Engineering*，*China University of Petroleum* (*Beijing*)，*Beijing* 102249，*China*；

2. *Researh Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest*，*China National Petroleum Corporation*，*Lanzhou* 730000，*Gansu*，*China*)

Abstract：The explosive fracturing technique is often adopted to produce and expand fractures due to its great shock waves，thus improving the low permeability of oil reservoirs. Based on the distribution characteristics of the explosive fracturing network and applying the Laplace transform and the Stehfest numerical inversion，this paper presents a new analytic mathematical production model for the complex—flow to an explosive fracturing well and obtains the formulas for the oil output under the constant pressure in different boundary conditions. On the basis of the model validation，this paper investigates the influence of the fracture network parameters on the output and the optimal design of the explosive fracturing. It is shown that the permeability of the fracture network exerts a great influence on the production. In addition，this paper offers an optimal design for explosive fracturing. The results from this study are expected to be significantly helpful for the optimal design of explosive fracturing and provide a rational design about the explosive quantity in low permeable reservoirs.

Key words：mechanics of explosion；explosive fracturing；complex-flow model；radius of stimulation reservoir area；optimal design；low permeable reservoirs

（责任编辑　王易难）