

文章编号: 0253-2697(2001)05-0063-05

裂缝性油藏射孔完井产能的有限元分析

李海涛 王永清 祝渝培 谭 灿

(西南石油学院石油工程学院 四川南充 637001)

摘要: 负压射孔已成为一种工业标准,成熟的砂岩油藏射孔优化设计理论只适用于无裂缝油藏的情形。裂缝的存在使得射孔完井油井的产能评价变得十分复杂,本文通过裂缝孔隙性油藏特征的三维物理模型描述及流体渗流的连续性方程建立,推导出了描述该问题的有限元数学模型。通过网格剖分、有限元数值求解和二次回归正交设计分析,首次获得了不同的射孔参数和地层参数与裂缝孔隙性油藏油井产能的定量关系,并进行了单因素及多因素结果分析,获得了一些重要结论。它可用于指导裂缝性及裂缝孔隙性油藏的射孔参数优化,提高一次完井效率。

关键词: 裂缝性油藏; 射孔; 有限元; 数值模拟; 回归; 产率比

中图分类号: TE319 **文献标识码:** A

保护储层的砂岩油藏油气井射孔完井优化理论与技术已经成熟并已推广应用,但裂缝性油藏射孔优化理论研究国内一直是无起步,只是从仅有的一篇国外文献获得一些定性认识,即 1985 年 Tariq S M^[1] 等人利用有限元方法对非均质页岩夹层和天然裂缝性油藏中射孔井产能进行的研究。研究表明,常见的非均匀地层特征强烈地影响射孔完井效率,造成油井产率发生显著变化,并建议采用大孔密射孔完井。裂缝的存在也使得这一问题复杂化,大大增加了研究的难度,因而到目前为止还没有形成系统的指导裂缝性油藏射孔优化和评价的方法。

对于一口新射开的油井,油井的产能只与近井区域地层的渗流密切相关,天然裂缝孔隙性油藏射孔井的生产能力完全取决于射孔孔眼与近井区域裂缝体系的水力连通性^[2]。也就是说裂缝孔隙性油藏射孔完井后的产能主要受天然裂缝类型、分布密度以及孔深、孔径和相位等因素控制,前两种因素是不可控因素,后三者则是人为可控制的参数。要实现裂缝孔隙性油藏射孔方案的优化设计达到既保护油藏又提高完井效率的目的,必须是在较好认识油藏裂缝特征基础上,建立相应渗流物理模型及数学模型,通过有限元求解分析,研究不同射孔参数对裂缝孔隙性油藏射孔井产能的影响,优选出最佳的射孔参数组合,在没有能力进行定方位射孔的条件下,达到统计意义上相对最佳的产能。因此问题研究主要归结为两个方面,一是油藏裂缝特征描述,二是选择适宜的数学物理方法研究射孔参数与油井产能的关系,获取宝贵的领域知识,以科学合理地指导施工。

1 裂缝性油藏射孔完井物理模型

1.1 裂缝基岩简化物理模型

裂缝性油藏是由互相连通的孔隙和通道构成的系统,孔隙构成“岩块系统”,通道构成“裂缝系统”,它们延伸分布在整个油藏中,即认为油藏是以粒间孔隙为主要储油空间,以裂缝为主要流动通道的双重介质渗流油藏。

裂缝网络从宏观上讲是十分杂乱的、无序的,而从相对微观的概念上讲裂缝系统则是有序的。如裂缝系统在给定的范围内由具有彼此平行的裂缝组成。一般来说,很难获得某地区裂缝网络分布的宏观概貌;相反,人们却常常能容易地从钻井、取心和测井资料中获得反映井筒附近地层的储层数据,如孔隙度、渗透率、裂缝特征等,这些数据既十分宝贵,又十分真实。

对于裂缝性油藏射孔井地层中流体流动问题的合理研究范围应是井眼附近地层,因为大量的研究已表明^[3],射孔引起的大部分井的流动动态的损害或改善都出现在井眼附近区域。

根据上面的分析和讨论,在这样一个相对较小的井筒附近区域的裂缝系统可以认为是较规则的,并且裂缝

特征参数可以从钻井、取心和测井资料中相对真实地获取。这对进行有限元模拟计算中的参数获取是十分有利的。因此,在井筒附近区域将裂缝系统简化为4种情况^[1](图1),即一组垂直裂缝、两组互相正交的垂直裂缝、一组水平缝和三组相互正交的裂缝是合理的,也是必要的,它将方便问题的解决。图1中基岩块的大小和形状取决于裂缝的类型和密度。

1.2 射孔完井三维渗流物理模型

对基岩裂缝系统进行简化以后,还应结合射孔参数,这样才能构成一个完整的三维物理模型。该模型应考虑三类特征参数包括①地层裂缝系统:包括裂缝类型、裂缝密度、裂缝及基质渗透率、孔隙度;②射孔参数:包括射孔布孔格式、相位、孔深、孔密、孔径;③污染特征参数:钻井污染厚度及程度、射孔损害带厚度及程度。不同的特征参数使物理模型具有各自不同的几何特征,它们对流体渗流也将产生不同程度的影响。

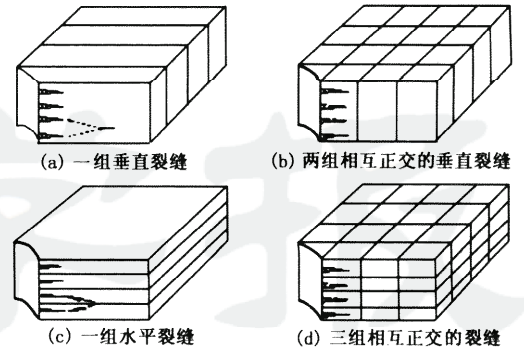


图1 裂缝基岩简化物理模型

Fig.1 The simplified physical models of fracture and matrix systems

2 射孔完井三维渗流有限元数学模型

对于存在裂缝情况下射孔完井井底渗流场的研究是十分复杂的,要准确地刻画其本质特性,用数值方法来模拟其渗流规律是应优先考虑的。数值方法就是将研究区域用许多网格、区域和节点将微分方程离散化,用小区域或节点上的解来代替真实解。而对于具有复杂三维几何形状的渗流场,用有限元方法^[4]进行数值模拟才是最适宜的。

对于研究裂缝性油藏射孔完井产能与射孔参数关系的特殊问题,只需研究射孔完井后稳定流动时油井的产能便可达到目的,假设射孔井底油层单元中的流动为单相液体,设地层水平渗透率为 K_r , X 方向的渗透率为 K_x , Y 方向的渗透率为 K_y ,垂向渗透率为 K_z 。在边界 S_1 上压力为已知函数 $\varphi(x,y,z)$,在边界 S_2 上为不渗透边界。根据渗流力学理论,在内部无源的情况下,则满足达西定律的三维稳定渗流模型为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

$$p|_{S_1} = \varphi(x,y,z) \quad (2)$$

$$\left(K_x \frac{\partial p}{\partial x} L_x + K_y \frac{\partial p}{\partial y} L_y + K_z \frac{\partial p}{\partial z} L_z \right) \Big|_{S_2} = 0 \quad (3)$$

式中 L_x, L_y, L_z 分别是边界表面外法线在 x, y, z 方向上的方向余弦, $S_1 + S_2$ 构成一封闭曲面,封闭曲面内的空间即为求解区域,以 Ω 表示。同样,在渗透率间断面 S_3 (如污染带与未污染带、裂缝与基质渗透率间断面)上有压力和流量的连续条件

$$p|_{S_3^-} = p|_{S_3^+} \quad (4)$$

$$\left(K_x \frac{\partial p}{\partial x} L_x + K_y \frac{\partial p}{\partial y} L_y + K_z \frac{\partial p}{\partial z} L_z \right) \Big|_{S_3^-} = \left(K_x \frac{\partial p}{\partial x} L_x + K_y \frac{\partial p}{\partial y} L_y + K_z \frac{\partial p}{\partial z} L_z \right) \Big|_{S_3^+} \quad (5)$$

上述的微分方程及其边界条件,一起构成了椭圆型边值问题。有限元方法无法直接对上述椭圆型边值问题进行求解,必须推导出与椭圆型边值问题相等价的变分方程,通过用有限元解变分方程,获得椭圆型边值问题的值。

通过推导,与井底渗流偏微分方程等价的变分方程是:寻求一个函数 $p(x,y,z) \in C^2(\Omega) \cap V_0$,使对任一函数 $V(x,y,z) \in V_0$ 都有

$$\iiint_{\Omega} \left(K_x \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + K_y \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} + K_z \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial V}{\partial z} \right) dx dy dz = 0 \quad (6)$$

即

$$B(p,V) = 0 \quad (7)$$

式中 $V(x, y, z)$ 称为检验函数, $\rho(x, y, z)$ 又叫试探函数。式(7)即是射孔完井三维数学模型所对应的有限元变分方程。

3 射孔完井产能评价方法

地下渗流三维偏微分方程,刻画了地层中流体的渗流规律,但它本身并不能模拟各种射孔参数对裂缝性地层中流体渗流的影响。各种射孔参数对流体渗流的影响是通过具体的有限元网格剖分来实现的,即不同的射孔参数所形成三维渗流物理空间是不同的。因此,要进行有效的网格剖分,进行有限元求解,首先应确定反映单井渗流场的物理空间区域。也就是说,必须建立反映客观实际的三维空间物理模型,它是有限元求解的基础。

3.1 有限元网格剖分

孔隙裂缝地层射孔井三维渗流物理模型的剖分是十分重要的。为了能模拟裂缝和孔眼对射孔井动态的影响,不能象油藏数值模拟那样将井筒或孔眼看成一个源或汇点,用一个网格块或几个来代表,必须对三维物理模型进行精细而恰当的网格剖分。为了考虑孔眼、裂缝、污染的影响,网格剖分应遵循的总原则有:①裂缝面必须为剖分面、孔眼内表面端部应为剖分面;②射孔损害带、地层污染带边界必为剖分面;③应根据压力降落的程度来安排网格剖分的疏密;④为了进行网格敏感性分析,剖分方法应有利于形成自动剖分程序代码。

图2是90°螺旋布孔三维剖分沿某一井筒半径柱面揭下的剖分网格图。图3是90°相位螺旋布孔三维剖分的总体示意图,图3中水平缝和垂直缝都以黑色条带表示。

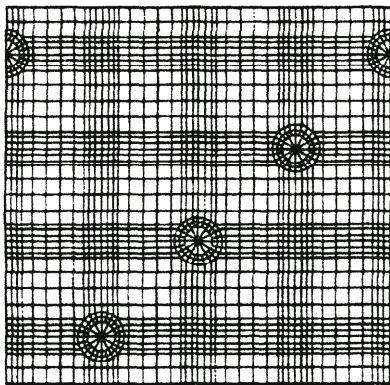


图2 90°相位螺旋布孔空间剖分柱面展开图

Fig. 2 Extended cylinder grid map of phase 90°

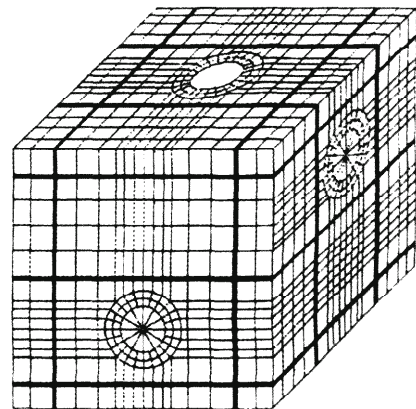


图3 90°相位螺旋布孔三维剖分总体示意图

Fig. 3 The 3-D sketch map of grid system for phase 90°

采用网格自动剖分技术,可在计算机内自动生成节点和单元、节点总体坐标、局部坐标和单元的渗透率等信息。

3.2 产能评价方法

油井射孔完井产能比定义为相同生产压差下射孔完井实际产量与理想裸眼井产量的比值,即

$$PR = \frac{Q_a}{Q_i} \Big|_{\Delta p = \text{Const}} \quad (8)$$

式中 Q_a 是射孔后的实际产量,通常是由有限元分析结果计算得出,而 Q_i 则是理想裸眼井产量。对裂缝孔隙性油藏来说,油层渗透率不容易象砂岩油藏那样很容易地获取,并且平面径向流公式很可能无法适用于裂缝孔隙性油藏,必须重新考虑。即①评价方法仍采用上式(8)计算,但渗透率用等效的视渗透率替换;②利用相同有限元代码,计算裸眼井的理想产能。

在相同几何条件下,剖分网格不变,但不考虑孔眼存在和污染存在的情况,仍用相同有限元代码将孔眼、污染带的渗透率赋以相应的裂缝孔隙的渗透率值,即可算出理想裸眼井的产能,该方法的适用性强,精度相对要高。但计算量较大,费用高。

4 结果分析

影响射孔完井产能的因素很多,不同的因素对油井产能有不同的影响,究竟哪些因素影响最大是必须解决的问题。只有这样,在进行裂缝孔隙性油藏射孔完井设计时才能分清主次,提出最佳射孔方案,获得最佳的井底连通条件,达到保护油层的目的。影响裂缝孔隙性油藏射孔完井产能的因素有三类,即地层裂缝参数、射孔参数和污染特征参数。

4.1 不同裂缝网络类型对油井产能的影响

裂缝网络物理模型的类型不同,同一射孔参数对油井产能的贡献是不一样的,同时每一裂缝类型的裂缝参数(如缝宽、缝密)对油井的产能也将产生不同程度的影响。

表1 不同裂缝网络模型对油井产能的贡献分析

Table 1 Contribution analysis of fracture network models on well productivity

类型	孔密(孔/m)			孔深(mm)			裂缝密度(条/m)		
	40	24	16	450	300	100	10	5	1
一组垂直缝	0.7945	0.7577	0.7364	0.7684	0.7438	0.5201	0.7807	0.7633	0.0723
二组垂直缝	1.0519	1.0300	1.0162	1.0418	0.9808	0.7789	1.1900	1.069	0.7880
一组水平缝	0.8918	0.8796	0.7667	0.8787	0.8492	0.6590	0.9350	0.8923	0.8012
三组正交缝	1.2240	1.2053	1.1932	1.2003	1.1557	0.8182	1.4301	1.2601	0.8652

注:孔密、孔深、缝密基准参数分别为24、400、4。

与裂缝密度一起交互作用,影响油井产能;对两组垂直裂缝情形,孔深和裂缝密度仍是最敏感的因素,孔密的影响次之;对一组水平裂缝情形,孔密和缝密交互作用是影响油井产能的重要因素之一;而对于三组相互直交裂缝系统,孔深和缝密交互作用,影响较为显著,孔密影响次之。

4.2 典型裂缝类型的单因素分析结果

对于存在三组正交裂缝网格模型的油藏,由于裂缝网络相互连通,因而一旦孔眼与裂缝相连,油井产能将十分可观。图4表示不同孔密和缝密情况下油井产能与孔眼深度的关系曲线(图4中 K_m 为孔密,孔/m; E 为裂缝密度,条/m)。随孔深增加,油井产能增加。在缝密较大的情况下,不论孔密大小,油井将获得极高的产能,油井产能随孔眼深度增加而增加的幅度很大,但在较低的缝密情况下,由于未穿透任何一条裂缝,不论孔密多大,随孔深增加油井产能的增加幅度很低,且产能始终较低。只有当孔深增加到足以穿透裂缝时,产能才有可能大幅度增加。

图5表示油井产能与缝密的关系(图中 K_m 为孔密,孔/m; K_s 为孔深,mm),说明不论孔眼是否穿遇裂缝,产能对孔密不太敏感(即不考虑增加孔密会增加与裂缝相遇机会的可能)。以上说明,在存在三组直交裂缝网络

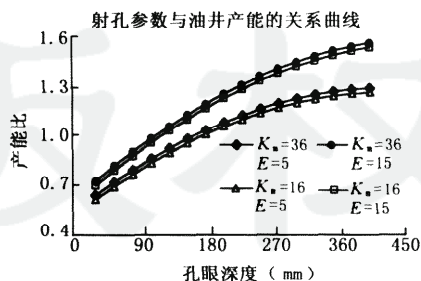


图4 油井产能与孔眼深度的关系曲线

Fig. 4 Relations between well productivity and penetration

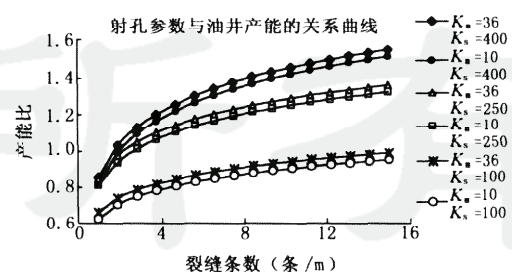


图5 油井产能与裂缝密度的关系曲线

Fig. 5 Relations between well productivity and fracture density

的情况,射孔穿透深度是最重要的因素,其次是裂缝密度。

裂缝孔隙性油藏射孔完井三维渗流压力分布模拟结果以一组垂直缝情况进行说明,图6是一组垂直缝

90°相位螺旋布孔格式下沿井圆周方向上压力分布,图中呈凹陷的地方或等压线分布较密集的地方就是孔眼的所在。

4.3 射孔参数与油井产能关系的定量规律

进行了裂缝孔隙性油藏射孔完井的单因素分析后,对各个因素对产率比的影响有了一定的认识。但要综合考虑各个单因素的影响,分清这些因素的影响主次,得出这些单因素与产率比 PR 的定量关系式,达到能预测裂缝孔隙性油藏射孔完井的产能和有效地进行射孔完井方案的优化设计就必须通过正交组合设计和二次非线性回归分析。

根据单因素分析,可以确定影响射孔完井产率比的因子有如下 12 个:射孔深度(x'_1)、压实损害程度(x'_2)、射孔密度(x'_3)、压实带厚度(x'_4)、孔眼直径(x'_5)、钻井污染程度(x'_6)、污染深度(x'_7)、射孔相位(x'_8)、井眼半径(x'_9)、地层各向异性系数 K_z/K_r (x'_{10})、裂缝渗透率(x'_{11})、裂缝密度(x'_{12})。由试验后进行回归分析得到产率比 PR 与各因子之间的定量关系式。这里以一组水平裂缝为例说明产率比(PR)与各因子之间的定量关系为

$$PR = 0.51904 + 0.02380x_2 + 0.05691x_3 + 0.07013x_6 + 0.16663x_8 - 0.03911x_2x_{11} - 0.05740x_4x_5 + 0.03980x_6x_7 - 0.03941x_1x_1 - 0.03785x_2x_2 - 0.03704x_4x_4 - 0.03803x_5x_5 - 0.04538x_6x_6 + 0.18128x_8x_8 - 0.03567x_9x_9 - 0.04465x_{10}x_{10} - 0.03786x_{11}x_{11} - 0.03512x_{12}x_{12}$$

其中 x'_i 与 x_i 存在对应一定的转换关系,即

$$x_i = (x'_i - x'_{0i})/\Delta_i, \quad \Delta_i = (x'_{2i} - x'_{0i})/2.314 \quad (i = 1, 2, \dots, 12)$$

式中 x_i 为各因子取值的线性变换编码值; x'_{1i} 、 x'_{2i} 分别为各因子取值的最小值和最大值; x'_{0i} 值为 x'_{1i} 与 x'_{2i} 的中值。

5 结 论

(1) 通过射孔参数对裂缝孔隙油藏射孔井产能的影响初步分析,裂缝网络模型的类型不同,同一射孔参数对油井产能的贡献不同。具有两组垂直裂缝和三组直交裂缝的油藏优于具有一组水平或垂直裂缝的情形。

(2) 对一组垂直裂缝情形,射孔深度是最重要的因素,它与裂缝密度和相位一起交互作用,严重影响油井产能,采用深穿透射孔弹是提高油井产能的唯一途径。

(3) 对一组水平裂缝情形,孔密和缝密交互作用是影响油井产能的重要因素,孔深影响次之。高孔密和深穿透可望获得较高产能。

(4) 对于存在两组裂缝情况,孔深和缝密是最敏感的因素,孔密影响很小。

(5) 对于存在三组正交裂缝情形,裂缝网格在水平、垂直方向上都具有较高传导能力,影响油井产能最重要、最直接的因素是孔深,其次是缝密,孔密的影响不大。

参 考 文 献

- [1] Tariq S M, Ichara M J. Performance of perforated completions in the presence of common heterogeneities: anisotropy, laminations, or natural fractures[C]. SPE 14320, 1985: 317~329.
- [2] T. D. 范 高 尔 夫 - 拉 特. 裂 缝 油 藏 工 程 基 础[M]. 秦 同 洛, 等 译. 北 京: 石 油 工 业 出 版 社, 1989: 231~268.
- [3] 潘迎德, 等. 使油井产能最高的射孔参数优选[J]. 西南石油学院学报, 1990, 12(2): 27~36.
- [4] 李开泰, 黄艾香, 黄庆怀. 有限元方法及其应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1984: 137~201.

(收稿日期 2000-04-03 修订日期 2000-10-23 编辑 杨 苗)

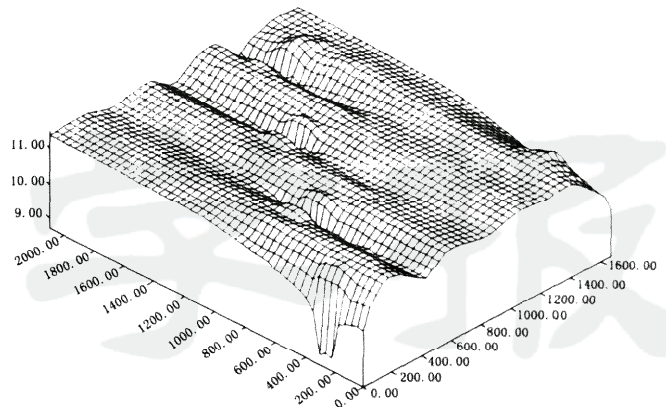


图 6 压力分布图

Fig. 6 The surface map of pressure distribution of phase 90° one cluster of vertical fractures

Key words: MEOR; carbon resource; lab experiment; enhanced oil recovery;

THEORETICAL MODE OF OVERALL FRACTURING OPTIMIZATION PLAN

JIANG Ting-xue, et al. (*Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang Branch, Langfang 065007, China*) ACTA 2001, 22(5): 58~62

Abstract: A new concept and method of overall hydraulic fracturing optimization is put forward in the paper taking the reservoir of Fan-128 located in Shengli Daluhu Oilfield as a field case. In this study, the integral reservoir which contains hydraulic fractures is regarded as a research element, the future reservoir development and its adjustment as well as the evaluation of fracturing effect as an ultimate object, and the distribution of dynamic and static parameters of geology and production as basic ones; finally, the fuzzy multiple factors decision-making method is utilized to optimize proppant fracture length. The proposed theoretical mode can take into account many factors such as the effective permeability, effective thickness, present formation pressure and analytical water cut as well, etc. With the help of above theoretical mode, the optimum proppant fracture length of various development stage may be available in a relatively high precision, which may change the abstract character of past overall fracturing optimization plan and in the meantime, improve the effectiveness and instruction of the overall fracturing optimization plan to single well fracturing design. Verified by other reliable technique, the result of the proposed mode in the paper is precise and it is convenient to put it into field application.

Key words: overall fracturing; optimization design; theoretical mode; parameters distribution; fuzzy decision-making

PRODUCTIVITY EVALUATION AND MODELING OF PERFORATED WELL IN NATURALLY FRACTURED RESERVOIR USING FINITE ELEMENT METHOD

LI Hai-tao, et al. (*Southwest Petroleum Institute, Nanchong 637001, China*) ACTA 2001, 22(5): 63~67

Abstract: Underbalance perforating has been widely adopted as a standard for perforating to obtain the optimum perforating performance. However, almost all studies about perforating optimization did not take into account the presence of natural fracture reservoir. The productivity evaluation of perforated producing well becomes very complicated in the presence of natural fracture in reservoirs. The mathematical model has been established in this paper based upon the given three-dimensional physical model describing the characteristics of seepage flow in the naturally fractured reservoir and continuity equation. The equation of variation for the finite element derivation has been deduced for obtaining the solution of the elliptical boundary value problem. The study has acquired the quantitative analysis results about the influence of different perforation and formation parameters towards the productivity of oil well in the naturally fractured reservoir through mesh subdivision, finite element numerical modeling and quadratic regression analysis in orthogonal designing. The important points obtained are very valuable to direct the operation of perforating completion in natural fracture reservoirs.

Key words: fracture reservoir; perforation; finite element; numerical simulation; regression; productivity ratio

PETROLEUM ENGINEERING

ICE LOADS ON FIXED INSTALLATION IN SHALLOW-WATERS OF BOHAI GULF