

文章编号: 1673-5005(2006)05-0062-05

裂缝各向异性油藏孔隙度和渗透率计算方法

张吉昌^{1,2}, 刘月田³, 丁燕飞⁴, 郭小哲³, 张华昌², 程时清³

(1. 中国矿业大学 资源与安全工程学院 北京 100083; 2. 辽河油田 勘探开发研究院 辽宁 盘锦 124010;
3. 中国石油大学 石油天然气工程学院 北京 102249; 4. 辽河油田 高升采油厂, 辽宁 盘锦 124010)

摘要 裂缝性油藏介质由基质和有效裂缝组成。利用岩心分析、测井、地震、薄片分析等静态描述手段测试并计算了基质的孔隙度和渗透率,得到裂缝的宽度、密度和方位等参数。以油藏流体流动模型为基础,利用生产、试井、试采或试油数据求出油藏总渗透率,再结合裂缝参数确定裂缝系统的各向异性渗透率。采用随机裂缝模型,由裂缝渗透率和裂缝宽度计算得到裂缝孔隙度。该方法给出了裂缝和基质系统的渗透率与孔隙度间的定量关系,确定的参数分布合理而完善,考虑了油田各种基础资料数据采集的成本和可行性,具有经济、高效、实用的特点。该方法的应用较好地解决了辽河油田小 22 块火山岩裂缝性油藏预测模型难以建立的问题。

关键词 裂缝性油藏;有效裂缝;静态描述;流体流动;建模;定量关系

中图分类号 TE 311 **文献标识码** A

Calculation method of porosity and permeability in fractured anisotropic oil reservoirs

ZHANG Ji-chang^{1,2}, LIU Yue-tian³, DING Yan-fei⁴,
GUO Xiao-zhe³, ZHANG Hua-chang², CHENG Shi-qing³

(1. College of Resource & Security Engineering in China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;
2. Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield, Panjin 124010, Liaoning Province, China;
3. Faculty of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
4. Gaosheng Oil Production Plant of Liaohe Oilfield, Panjin 124010, Liaoning Province, China)

Abstract : Fractured reservoirs media consist of matrix and effective fractures. The porosity and permeability of matrix, and the width, density and direction parameters of fractures were obtained by core analysis, well logging, seism and thin section observation methods. On the basis of reservoir fluid flow model, the assembled permeability of the formation was determined by well production, well testing, production test or formation testing data. By integrating formation permeability and fracture parameters above, the anisotropic permeability was calculated. Utilizing the stochastic fracture model, porosity of fracture system was determined from fracture width and permeability. Quantitative correlations among the permeability and porosity of fracture and matrix systems were provided. The permeability and porosity distributions given are valid and comprehensive. The cost and feasibility of collection of the basic data from field were considered, so the methodology is economical, practical and highly effective. By the application of the method in a volcanic reservoir of Xiao 22 in Liaohe Oilfield, the problems in reservoir modeling were resolved.

Key words : fracture reservoirs; effective fracture; static characterization; fluid flow; modeling; quantitative relation

对于裂缝性油藏孔隙度和渗透率的确定这一难题,国内外学者已经做了大量研究工作^[1-12]。但由于油藏介质中不连通裂缝和洞穴的存在以及钻井过

程对近井地层的影响,静态测试方法往往不能反映实际油藏内裂缝的发育程度和导流能力。虽然利用动态数据可以得到油藏的导流能力,但往往难以区

收稿日期 2005-12-12

基金项目 国家自然科学基金资助项目(10172061)

作者简介 张吉昌(1969-)男(汉族)辽宁沈阳人,高级工程师,中国矿业大学博士研究生,从事油藏地质与开发研究工作。

分裂缝与基质的贡献,难以提供油藏的微观结构特征。文献[13-15]提出了裂缝性油藏静态综合建模的思路,但大都局限于定性或经验方法,且没有考虑裂缝渗透率的各向异性特点。笔者将静态研究相融合,尝试建立完善而实用的裂缝性油藏孔隙度和渗透率的定量计算方法。

1 裂缝性油藏参数求解模型

假设裂缝性油藏内储集和渗流空间包括基质孔隙与裂缝,裂缝只包括可作为渗流通道的有效裂缝,基质孔隙则包括原生孔隙、溶洞及不连通裂缝等除有效裂缝以外的所有储集空间。采用双孔双渗模型,油藏总孔隙度 φ 由基质孔隙度 φ_b 和裂缝孔隙度 φ_f 组成:

$$\varphi = \varphi_b + \varphi_f. \tag{1}$$

油藏总各向异性渗透率张量 K 由裂缝渗透率张量 K_f 和基质渗透率 k_b 组成。记 I 为二阶单位张量,则有

$$K = K_f + k_b I. \tag{2}$$

假设总渗透率张量主值为 k_I, k_{II}, k_{III} ,定义方向平均总渗透率为 $k = (k_I k_{II} k_{III})^{1/3}$,裂缝渗透率张量主值为 $k_{fI}, k_{fII}, k_{fIII}$,定义方向平均裂缝渗透率为 $k_f = (k_{fI} k_{fII} k_{fIII})^{1/3}$,同时有如下关系:

$$k_i = k_{fi} + k_b, i = I, II, III. \tag{3}$$

采用随机裂缝模型[16],则裂缝孔隙度 φ_f 与方向平均裂缝渗透率 k_f 、平均裂缝宽度 b 之间有如下关系:

$$\varphi_f = 0.0296 k_f / b^2. \tag{4}$$

假设油藏内流体流动遵循达西定律,流体由地层向井的流动为拟稳态流动。设油藏面积为 A_e ,油藏内有 n 口井依次投产(投注),第 n 口井的控制面积为 $A_n = A_e / n$,该井供液半径为 $r_{en} = \sqrt{A_n / \pi} = \sqrt{A_e / \pi n}$,则该井产量 q_n 和其生产压差 Δp_n 的关系为

$$q_n = \frac{0.1728 \pi k_n h_n \Delta p_n}{\mu \ln \frac{r_{en}}{r_w}}. \tag{5}$$

式中, μ 为油藏流体粘度, mPa·s; r_w 为井筒半径, m; k_n 为油藏内第 n 口井处方向平均总渗透率, 10^{-3} μm²; h_n 为第 n 口井油层厚度, m。

以上述模型为基础,利用岩心分析、综合测井、生产动态等数据资料,确定油藏基质与裂缝的孔隙度和渗透率。

2 基础数据处理

根据岩心分析、测井解释及薄片分析等资料统计得到裂缝宽度分布及裂缝平均宽度。

裂缝密度 L_{fd} 指的是沿垂直于裂缝方向单位长度内裂缝的条数。以单井单层段为目标,将裂缝测井的解释结果进行统计分析,结果见表1,由此计算该井段上的裂缝密度。

表 1 裂缝测井解释结果

编号	深度 z/m	倾角 $\alpha(^{\circ})$	方位角 $\beta(^{\circ})$	性质
1	3 008.0	59	157	层理面
2	3 008.2	61	169	闭合
3	3 008.7	60	146	开启
...	...	...	...	...
118	3 410.0	74	152	开启
119	3 410.2	70	155	层理面
120	3 410.8	71	160	闭合

考虑井筒方向与裂缝间夹角的影响,确定裂缝密度的公式为

$$L_{fd} = \sum_{i=1}^{m_f} \frac{1}{L_w \sin \alpha_i + D_w \cos \alpha_i}. \tag{6}$$

式中, L_w 为目标井段长度, m; D_w 为井筒直径, m; α_i 为第 i 条裂缝的倾角($^{\circ}$); m_f 为目标井段穿过的裂缝条数。

在油井试油、试采及生产过程中选取单井采液(注水)量 q_n 及其相应时刻的生产(注水)压差 Δp_n 。

3 孔隙度与渗透率的计算

3.1 基质孔隙度

长期的和大量的油气田开发实践已证明,静态方法如岩心分析、测井等测试所得基质孔隙度数据一般是可靠的,同时测井方法具有低成本的特点。因此采用经过岩心分析校核的测井解释数据计算基质孔隙度。计算式为

$$\varphi_b = (\Delta t_{ma} - \Delta t) / (\Delta t_{ma} - \Delta t_{fl}). \tag{7}$$

式中, Δt 、 Δt_{ma} 和 Δt_{fl} 分别为基质、岩石骨架和流体的声波时差, s/m。

3.2 基质渗透率

基质渗透率与基质孔隙度之间存在较为可靠的定量关系,可以根据室内岩心试验获得其关系式。

(1)选取孔渗关系模型,如:

$$k_b = c_1 \exp(c_2 \varphi_b). \tag{8}$$

(2)利用岩心分析数据拟合关系式,求得常数 c_1 和 c_2 。

(3)将研究区域基质孔隙度代入式(8)计算得

到基质渗透率 k_{10} 。

3.3 油藏总方向平均渗透率

利用式(5)进行求解,假设油藏流体粘度、井筒半径和油层厚度皆为已知量。根据油田实际动态数据情况,采用两种不同的处理方法计算。

(1)油田现场可以同时提供油藏平均压力、井底流压和井的注采液量,则从动态生产数据中直接选取 Δp_n (即油藏平均压力与井底流压之差)和 q_n ,代入式(5)求得 k_i ($i = 1, \dots, n$)。

(2)油田现场只能提供单井的井底流压和注采液量,无法提供油藏平均压力,则式(5)的具体实现步骤如下:

$$\text{第1口井:由 } q_1 = \frac{0.1728\pi k_1 h_1 (p_e - p_{w1})}{\mu \ln \frac{r_{e1}}{r_w}} (p_e$$

为油藏原始压力, p_{w1} 为井底流压) 求出 k_1 ; 由 $p_1 = p_e - \frac{p_e - p_{w1}}{2 \ln \frac{r_e}{r_w}}$ 求得只有1口井生产时油藏平均压力 p_1 。

$$\text{第2口井:由 } q_2 = \frac{0.1728\pi k_2 h_2 (p_1 - p_{w2})}{\mu \ln \frac{r_{e2}}{r_w}}$$

求出 k_2 ; 再由 $p_2 = p_e - \frac{p_e - p_{w1}}{2 \ln \frac{r_e}{r_w}} - \frac{p_e - p_{w2}}{2 \ln \frac{r_e}{r_w}}$ 求得有2口井生产时油藏平均压力 p_2 。

$$\text{第 } n \text{ 口井:由 } q_n = q_1 = \frac{0.1728\pi k_n h_n (p_{n-1} - p_{wn})}{\mu \ln \frac{r_{en}}{r_w}}$$

求出 k_n ; 再由 $p_n = p_e - \frac{\sum_{i=1}^n p_{wi}}{2 \ln \frac{r_e}{r_w}}$ 求得有 n 口井

生产时油藏平均压力 p_n 。

至此,所有井段内的方向平均渗透率均已得到。为增加可靠性,可在每口井生产期内取多对产量-压差数据点,求得多个结果再取其平均值。

3.4 裂缝各向异性渗透率

利用每一井段内的方向平均渗透率和裂缝分布方向求得该处裂缝各向异性渗透率张量。

根据方向平均渗透率的定义和式(3),可得

$$k = [(k_I + k_b) \cos^2 \beta + (k_{II} + k_b) \sin^2 \beta]^{1/3} \quad (9)$$

利用概率统计原理,假设在任一井段内共有 m_i 条裂缝,各条裂缝的内部渗透率皆为 $1 \mu\text{m}^2$; 任意一条裂缝 i 的方位角为 β_i , 倾角为 α_i , 如图1所示。根据

张量变换原理^[17],裂缝 i 在井段 L_w 处所产生的拟渗透率张量为

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{xy} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{xz} & f_{yz} & f_{zz} \end{bmatrix}_i = \frac{10^{-3} b}{L_w \sin \alpha_i + D_w \cos \alpha_i} \times \begin{bmatrix} t_{x1} & t_{x2} & t_{x3} \\ t_{y1} & t_{y2} & t_{y3} \\ t_{z1} & t_{z2} & t_{z3} \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{x1} & t_{y1} & t_{z1} \\ t_{x2} & t_{y2} & t_{z2} \\ t_{x3} & t_{y3} & t_{z3} \end{bmatrix}_i$$

其中

$$\begin{bmatrix} t_{x1} & t_{x2} & t_{x3} \\ t_{y1} & t_{y2} & t_{y3} \\ t_{z1} & t_{z2} & t_{z3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha_i \cos \beta_i & \sin \beta_i & \cos \alpha_i \cos \beta_i \\ -\sin \alpha_i \sin \beta_i & \cos \beta_i & -\cos \alpha_i \sin \beta_i \\ -\cos \alpha_i & 0 & \sin \alpha_i \end{bmatrix}$$

该井段裂缝总拟渗透率张量为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{xy} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{xz} & f_{yz} & f_{zz} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{m_i} \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{xy} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{xz} & f_{yz} & f_{zz} \end{bmatrix}_i \quad (10)$$

式中, f_{ij} ($i, j = x, y, z$) 为拟渗透率张量分量, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

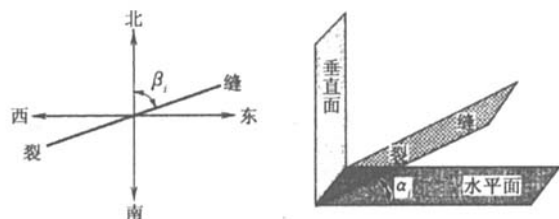


图1 裂缝 i 的方位示意图

由拟渗透率张量可求得各向异性渗透率的拟主方向和拟主值 f_I, f_{II}, f_{III} 。

根据各向异性渗流理论^[18-19],有

$$k_{fI} : k_{fII} : k_{fIII} = f_I : f_{II} : f_{III} \quad (11)$$

将式(9)和式(11)联立可得

$$f_I f_{II} f_{III} k_{ij}^3 + f_j (f_{II} f_{III} + f_{III} f_I + f_I f_{II}) k_b k_{ij}^2 + f_j^2 (f_I f_{II} f_{III}) k_b^2 k_{ij} = f_j^3 (k^3 - k_b^3) \quad j = I, II, III \quad (12)$$

由式(12)可求得实际裂缝各向异性渗透率的主值。显然,实际裂缝渗透率的主方向与拟渗透率相同。由裂缝渗透率的主方向和主值,可得渗透率张量为

$$\mathbf{K}_f = \begin{bmatrix} k_{fxx} & k_{fxy} & k_{fzx} \\ k_{fxy} & k_{fyy} & k_{fyz} \\ k_{fzx} & k_{fyz} & k_{fzz} \end{bmatrix} = \frac{(k_{fI} k_{fII} k_{fIII})^{1/3}}{(f_I f_{II} f_{III})^{1/3}} \times \begin{bmatrix} f_{xx} & f_{xy} & f_{xz} \\ f_{xy} & f_{yy} & f_{yz} \\ f_{xz} & f_{yz} & f_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 $k_{fij}(i, j = x, y, z)$ 为渗透率张量的分量, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.5 裂缝系统孔隙度

根据 k_{fI} , k_{fII} 和 k_{fIII} 可求得方向平均裂缝渗透率: $k_f = (k_{fI} k_{fII} k_{fIII})^{1/3}$ 。将 k_f 及裂缝宽度 b 代入式(4),便可求得有效裂缝的孔隙度 φ_{fo} 。

3.6 总孔隙度和渗透率

将式(4)和式(7)代入式(1),即可得到油藏总孔隙度;将式(8)和式(13)代入式(2),即可得到油藏总渗透率张量;将式(8)和 k_{fI} , k_{fII} , k_{fIII} 代入式(3),即可得到总渗透率张量主值。

4 方法讨论

由式(1)~(4)(7)(8)(12)(13)及其相关各式组成了完整的求解裂缝性油藏孔渗参数的定量计算模型。由模型计算得到了各井各层段基质和裂缝系统的孔隙度与渗透率后,对其进行离散处理,即可得到这些参数在整个油藏内的分布。对渗透率张量进行离散就是对其各分量分别进行离散。

式(7)计算的孔隙度往往是油藏总孔隙度 φ , 一般情况下 $\varphi_f \ll \varphi_b$, 可直接令 $\varphi_b = \varphi$ 。但若 φ_f 较大时,须进行修正,步骤如下:

(1)用 3.5 节中得到的 φ_f 值,对式(7)求出的孔隙度 φ 进行修正: $\varphi_b = \varphi - \varphi_f$;

(2)取新的基质孔隙度 φ_b ,重新计算 3.2 ~ 3.6 节所指各参数;

(3)重复(1)和(2),直至 φ_b 不再变化。

如果油田现场能够提供干扰试井资料,则可以直接用其确定地层裂缝渗透率张量。步骤为:

(1)利用干扰试井方法确定油藏总各向异性渗透率张量 K ;

(2)裂缝系统的各向异性渗透率张量 $K_f =$

$\begin{bmatrix} k_{fxx} & k_{fxy} \\ k_{fxy} & k_{fyy} \end{bmatrix} = K - k_b I$ 。由裂缝渗透率张量可求出裂缝主方向及渗透率主值 k_{fI} , k_{fII} , k_{fIII} 。

(3)其他参数求法与第 3 节相同。

5 应用实例

应用以上方法建立了辽河油田小 22 块火山岩裂缝性油藏预测模型,较好地解决了该类油藏建模的难题。经计算得到油藏物性参数为:基质孔隙度 φ_b 为 6.26% ~ 13.72%, 基质渗透率 k_b 为 $(0.21 \sim 0.55) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 在裂缝较发育区,有效裂缝孔隙度 φ_f 为

0.0295% ~ 0.060%, 裂缝渗透率 k_f 为 $(36 \sim 73) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。从总体上看,地层平面内北偏西 25° 方向油藏渗透率最大,北偏东 65° 方向渗透率最小。

6 结束语

考虑各种静动态油藏资料形成的裂缝性油藏物性参数确定方法,可以建立完善、合理、具有自协调性的裂缝性油藏参数分布模型,提供油藏参数间的定量关系。该计算方法具有经济、高效、实用的特点。

参考文献:

[1] WARREN J E, ROOT P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245-252.

[2] LONG J C S. A model for steady state flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures[J]. Water Resources Research, 1985, 21(10): 1105-1115.

[3] RICHARD G H, MARTIN J B. Pore-scale modeling of multiphase flow in fractures and matrix/fracture transfer [R]. SPE 56411, 1999.

[4] JOLLY R J H, WEI L, PINE R J. Stress-sensitive fracture-flow modelling in fractured reservoirs[R]. SPE 59042, 2000.

[5] 穆龙新. 裂缝储层地质模型的建立[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(6): 78-82.

MU Long-xin. Establishment of the geological model of fractured reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(6): 78-82.

[6] 张吉昌, 田国清, 刘建中. 储层构造裂缝的分形分析[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(4): 65-67.

ZHANG Ji-chang, TIAN Guo-qing, LIU Jian-zhong. A fractal analysis on structural fractures of reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(4): 65-67.

[7] VAN Dijk J P. Analysis and modeling of fractured reservoirs [R]. SPE 50570, 1998.

[8] 尹志军, 黄述旺, 陈崇河. 用三维地震资料预测裂缝[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(1): 78-80.

YIN Zhi-jun, HUANG Shu-wang, CHEN Chong-he. Fracture determination by means of 3-dimensional seismic data[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(1): 78-80.

[9] FAIRHURST D L, MARFICE J P, SEIM M R, et al. Completion and fracture modeling of low-permeability gas sands in south Texas enhanced by magnetic resonance and sound wave technology [R]. SPE 59770, 2000.

[10] RANMEY H J. Interference analysis for anisotropic formations—a case history[J]. JPT, 1975, 27(10): 25-29.

[11] 聂立新, 黄炳家, 王才经. 各向异性天然裂缝油藏裂缝方位的确定[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1997, 21

(6) 39-41.

NIE li-xin, HUANG Bing-jia, WANG Cai-jing. Determination of orientation of the fractures in an anisotropic naturally fractured reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1997 21(6) 39-41.

- [12] 张永贵, 陈明强, 吴莹. 利用动态资料研究巴喀油田裂缝分布[J]. 石油勘探与开发, 1998 25(5) 68-71.

ZHANG Yong-gui, CHEN Ming-qiang, WU Ying. Integrating dynamics data to characterize naturally fractured reservoir—a case study of Baka Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998 25(5): 68-71.

- [13] GURPINAR O, KALBUS J, LIST D F. Numerical modeling of a large, naturally fractured oil complex [R]. SPE 59061 2000.

- [14] ABBASZADEH M, CORBETT C, BROETZ R, et al. Development of an integrated reservoir model for a naturally fractured volcanic reservoir in China[R]. SPE 59439 2000.

- [15] 孙业恒, 时付庚, 王成风, 等. 低渗透砂岩油藏储集层双孔双渗模型的建立方法[J]. 石油勘探与开发, 2004 31(4) 79-82.

SUN Ye-heng, SHI Fu-geng, WANG Cheng-feng, et al. Modeling of dual-porosity and dual-permeability for low-permeability sandstone reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development 2004 31(4) 79-82.

- [16] GOLF-RACHT T D V. Fundamentals of fractured reservoir engineering[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982 31-50.

- [17] 郭仲衡, 张量(理论和应用) [M]. 北京: 科学出版社, 1988 55-68.

- [18] 刘月田, 葛家理. 各向异性圆形地层渗流的解析解[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000 24(2) 40-43.

LIU Yue-tian, GE Jia-li. Analytic solution for fluid flow through a circular anisotropic formation[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2000 24(2) 40-43.

- [19] 刘月田. 各向异性油藏水平井渗流和产能分析[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2002 26(4) 41-47.

LIU Yue-tian. Analysis on seepage flow and productivity of a horizontal well in anisotropic reservoir[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2002 26(4) 41-47.

(编辑 李志芬)

(上接第52页)

- [3] 葛洪魁, 黄荣樽, 庄锦江, 等. 三轴应力下饱和水砂岩动静弹性参数的试验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994 18(3) 41-47.

GE Hong-kui, HUANG Rong-zun, ZHUANG Jin-jiang, et al. Experimental study on dynamic and static elastic parameters of water-saturated sands under triaxial stresses [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 1994 18(3) 41-47.

- [4] HOWARTH D F. Apparatus to determine static and dynamic elastic modul[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1984 17 255-264.

- [5] RINGSTAD C, LOFTHUS, ELLEN Benedikte, et al. Prediction of rock parameters from micro-indentation measurements: the effect of sample size[R]. SPE 47313, 1998.

- [6] 邹德永, 程远方, 查永进, 等. 利用岩屑波速随钻检测地层可钻性及优选钻头类型[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005 29(1) 37-40.

ZOU De-yong, CHENG Yuan-fang, ZHA Yong-jin, et al. Rock drillability evaluation and bit selection through ultrasonic velocity measurement on cuttings[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2005 29(1) 37-40.

(编辑 李志芬)

(上接第56页)

参考文献:

- [1] 宋治. 油层套管损坏原因分析及预防措施[J]. 石油学报, 1987 8(2) 101-107.

SONG Zhi. Causes and prevention of casing damage[J]. Acta Petrolei Sinica, 1987 8(2) 101-107.

- [2] 万仁溥, 罗英俊. 采油技术手册(修订本)(第七分册) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.

- [3] 何汉坤, 杨启明, 李鸿新, 等. 出砂因素对采油井套管损坏力学分析[J]. 河南石油, 2004 18(2) 50-52.

万方数据

HE Han-kun, YANG Qi-ming, LI Hong-xin, et al. Mechanical analysis on casing damage caused by sand production in producers[J]. Henan Petroleum, 2004 18(2): 50-52.

- [4] NOBUO Morita, HARRY Mcleod. Oriented perforation to prevent casing collapse for highly inclined wells[R]. SPE 28556, 1995.

- [5] 范钦珊. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

- [6] 王仲茂, 卢万恒, 胡江明. 油田油水井套管损坏的机理及防治[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.

(编辑 修荣荣)