

致密砂岩裂缝测井评价方法 及其在迪那 2 气田的应用

管英柱 (成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059)

李 军, 张超谟, 许赛男 (教育部油气资源与勘探技术重点实验室 (长江大学), 湖北 荆州 434023)

[摘要] 裂缝发育对致密低孔低渗砂岩储层具有重要意义。在岩心刻度基础上, 综合利用井壁成像测井和双侧向测井资料, 采用图像处理和数值模拟计算技术可以得到砂岩裂缝宽度和裂缝孔隙度等参数, 进而估算裂缝渗透率。库车地区迪那 2 气田为典型的低孔低渗砂岩储层, 且储层中裂缝发育, 这些裂缝构造大大改善了储层品质, 提高了油气产能, 利用测井资料能够定量地对裂缝进行评价。研究结果表明: 砂岩裂缝的发育降低了有效储层下限, 使下限孔隙度从原先的 6% 降低到 3%, 从而大大增加了有效储层厚度, 研究区增幅达到 20% ~ 30%, 同时裂缝定量参数的引入, 也使得利用测井方法预测该类储层产能成为现实, 加深了对这类储层的认识。

[关键词] 测井评价; 致密砂岩; 裂缝; 低孔低渗; 定量评价; 库车地区

[中图分类号] P631.84

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-9752 (2007) 02-0070-05

近年来, 致密低孔低渗砂岩储层油气勘探已取得重大进展, 尤其是低孔低渗天然气层的勘探和开发, 已成为国内外石油工业的热点领域。我国塔里木盆地克拉 2 气田、迪那 2 气田属于典型大型低孔低渗气藏, 它们的发现和开发拉开了“西气东输”工程的序幕。低孔低渗砂岩储层由于特殊的沉积、成岩和构造条件, 导致岩性致密, 储层中往往发育裂缝构造, 这些裂缝构造对改善储层品质, 提高油气产能具有重要的意义。但是, 要精细评价这些裂缝, 仍然是一项世界性难题。笔者将以迪那 2 气田砂岩裂缝为例, 以测井方法为主要手段, 对定量评价砂岩裂缝的方法进行探索, 并研究其对低孔低渗砂岩储层的改造作用。

1 迪那 2 气田基本地质特征

迪那 2 气田位于塔里木盆地库车坳陷秋里塔格构造带东部。构造为一受南、北 2 条倾向相同的逆冲断层所夹持的长轴背斜, 产层层位为下第三系苏维依组和库姆格列木群, 岩石类型主要为褐色粉砂岩、泥质粉砂岩、中-细砂岩、杂色含砾砂岩、砾岩等, 总体具有成分成熟度和结构成熟度低的特点。储层孔隙度一般在 3.04% ~ 10.34%, 平均 6.95%, 渗透率一般在 $0.02 \times 10^{-3} \sim 4.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 平均 $0.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 具有显著的特低孔低渗特征。区域盖层为上第三系吉迪克组的巨厚膏岩、膏泥岩层。气田实测压力系数达 2.14 ~ 2.29, 地质储量达到大型气藏规模。岩心观察和测井资料表明, 致密砂岩储层中裂缝发育, 这些裂缝构造大大改善了储层品质。

2 砂岩裂缝测井定量评价方法探索

目前, 砂岩裂缝测井定量评价方法尚在不断探索和完善之中。下面针对迪那 2 气田地质特征, 从岩心分析入手, 就测井评价砂岩裂缝的方法进行探索, 并对其效果进行分析。

2.1 基于岩心和 Matlab 地质图像处理方法的裂缝参数获取

岩心裂缝描述和测量是研究裂缝展布规律和定量评价的基础。描述时, 包括以下内容: 裂缝宽度、

[收稿日期] 2007-01-22

[作者简介] 管英柱 (1972-), 男, 1996 年大学毕业, 博士生, 现主要从事油气田开发工程方面的研究工作。

裂缝间距、裂缝密度、裂缝产状、裂缝充填物性质和溶蚀状况等。利用 Matlab 系统提供的图像处理工具编制计算机软件，并对岩心地质图像进行处理，可以很方便地得到面孔率、裂缝宽度、裂

缝长度等参数^[1,2]。利用上述方法对库车地区迪那 2 气田、克拉 2 气田和依南 5 井区的岩心资料进行了处理，获得相应的裂缝参数。迪那 2 气田下第三系砂岩储层裂缝宽度主要以 0.5~1.0mm 为主，平均宽度 0.75mm，相应裂缝孔隙度在 0.01%~0.03% 之间，平均 0.02%；少量裂缝宽度在 1.0~3.0mm 之间，平均 2.5mm，相应裂缝孔隙度在 0.03%~0.04% 之间（图 1）。

2.2 基于井壁成像测井的裂缝参数获取

高分辨率、高覆盖率的井壁成像测井能够清晰反映井筒井壁结构，利用井壁成像图可以计算出裂缝孔隙度、裂缝长度、裂缝宽度和裂缝密度。其中裂缝孔隙度指裂缝在 1m 井壁上的视开口面积除以 1m 井段中电成像的覆盖面积；裂缝长度为每平方米井壁所见到裂缝长度之和，m/m²；裂缝宽度等于单位井段（1m）中裂缝轨迹宽度的平均值，cm；裂缝密度为每米井段所见到的裂缝总条数。

裂缝视孔隙度计算公式为： $\phi_i = \frac{L_i w_i}{2 RCH}$ 。式中， w_i 为第 i 条裂缝平均宽度，mm； L_i 为第 i 条裂缝的长度，m； R 为井眼半径，mm； C 为电阻率成像测井的井眼覆盖率，%； H 为统计井段的长度，m。

裂缝长度计算公式为： $F_L = \frac{L_i}{2 RHC}$ 。

裂缝宽度计算公式为： $W = aA R_{XO}^b R_M^{1-b}$ 。式中， W 为裂缝宽度，mm； A 为由裂缝造成的电导异常，mm； R_{XO} 为地层电阻率（一般情况下是侵入带电阻率）； R_M 为泥浆电阻率； a, b 为与仪器有关的常数，其中 b 接近于零。

2.3 基于双侧向测井的裂缝参数获取

双侧向测井资料在评价裂缝性碳酸盐岩储层中得到广泛应用。在裂缝性碳酸盐岩中，由于基块电阻率很高，而裂缝中泥浆滤液电阻率很低，这样在裂缝性储层段深侧向电阻率降低得很多，而且深、浅侧向差异程度和差异性质与裂缝产状和裂缝发育程度有关，可以利用双侧向电阻率的这种响应特征反演得到有关裂缝定量评价参数，如裂缝张开度、裂缝孔隙度等。

对于裂缝性砂岩储层，当基块孔隙度较低或者由于胶结物影响造成基块电阻率较高时，砂岩基块电阻率与裂缝中泥浆滤液电阻率反差大，这时双侧向电阻率对砂岩中裂缝响应较灵敏，可以利用双侧向测井来评价裂缝发育状况。但当砂岩基块电阻率较低时，基块电阻率与裂缝中泥浆滤液电阻率反差小，这时双侧向测井对砂岩裂缝响应不灵敏。下面以非均质导电模型为基础，结合研究区砂岩储层条件对双侧向裂缝响应特征进行正演数值计算，借此分析双侧向电阻率评价砂岩裂缝的地区适应性。

欧阳健等（2001）以 A. P. Philippe 非均质导电模型为基础，对双侧向测井裂缝响应特征进行了理论分析^[3]。裂缝性地层导电模型表示如下：

$$\begin{cases} v = b + \phi_f \sin^2 \\ H = b + \frac{\phi_f}{2} (1 + \cos^2 \theta) \end{cases} \tag{4}$$

式中， v, H 分别为垂直方向和水平方向的电导率； b, f 分别为基块和裂缝内流体的电导率； ϕ 为裂缝孔隙度； θ 为裂缝倾角。引入附加导电系数 $X = \phi_f / b$ 。

X 反映附加导电性的大小， X 值越大，附加导电性越强；反之附加导电性越弱。

垂直方向和水平方向的电阻率（ R_v 和 R_H ）各向异性系数 为：

$$= \frac{\sqrt{R_v}}{\sqrt{R_H}} = \frac{\sqrt{H}}{\sqrt{V}} = \frac{\sqrt{2 + X(1 + \cos^2)}}{\sqrt{2 + 2X\sin^2}} \quad (5)$$

在各向同性介质中,有 $X = 0$, $= 1$ 。由于深侧向测井聚焦优于浅侧向测井,近似地有深侧向测井视电导率 $_{\text{ld}} = H$,浅侧向测井视电导率 $_{\text{ls}} = \sqrt{H V}$,即:

$$\begin{aligned} _{\text{ld}} H &= b + \frac{\phi_f}{2} (1 + \cos^2) \\ _{\text{ls}} &= \sqrt{V H} = \sqrt{\left(b + \phi_f \sin^2 \right) \left(b + \frac{\phi_f}{2} (1 + \cos^2) \right)} \\ \frac{_{\text{ls}}}{_{\text{ld}}} &= \frac{\sqrt{V H}}{H} = \sqrt{\frac{V}{H}} = \frac{1}{\sqrt{2 + X(1 + \cos^2)}} \end{aligned}$$

针对库车地区地质条件,利用上述原理,对致密砂岩裂缝的测井响应特征进行模拟计算,力图得到基于双侧向测井资料的砂岩裂缝评价模型。模拟结果表明,在致密砂岩中(基质孔隙度 $< 8\%$ 时),裂缝愈发育,双侧向测井电阻率相对于基质电阻率降低愈多。随着裂缝发育程度的增加,双侧向电阻率显著降低,而且双侧向差异幅度增大(图 2)。因此,在砂岩裂缝分析中,可以构建电阻率差比函数 R_{IC} 来定量分析裂缝发育程度: $R_{\text{IC}} = \frac{R_{\text{ld}} - R_{\text{ls}}}{R_{\text{ld}}}$,式中, R_{ld} 和 R_{ls} 分别为深、浅侧向电阻率。 R_{IC} 愈大,裂缝愈发育,反之亦然。

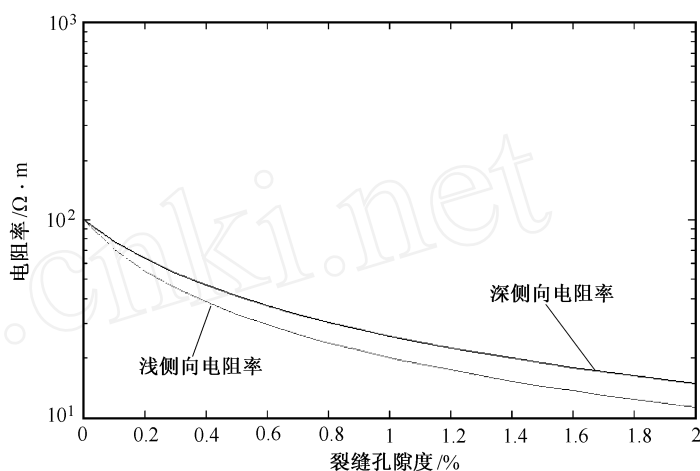


图 2 双侧向电阻率与裂缝发育程度关系

2.4 岩心刻度测井

在取心段对砂岩裂缝进行细致的描述和测量,获得岩心裂缝宽度和裂缝孔隙度等裂缝参数,对相应井段井壁成像测井资料进行精细解释和定量计算,获取相应的裂缝定量参数。分别对岩心裂缝参数和测井裂缝参数作直方分布图,利用它们之间的相似性确定岩心参数与测井参数的刻度关系。图 1 显示该区岩心裂缝宽度分布与测井计算的裂缝宽度分布具有可比性,岩心裂缝宽度对测井裂缝宽度刻度系数为 4.36,即测井裂缝宽度乘以系数 4.36 即得到岩心裂缝宽度。岩心裂缝孔隙度与测井孔隙度相对比,二者也具有较好相似性,而且分布范围也在同一个数量级范围内,可以不作刻度转换。

2.5 致密砂岩基质渗透率与裂缝渗透率估算

裂缝性砂岩储层具有基质孔隙和裂缝孔隙双重介质特点,其渗透率 K 不是由单一基质渗透率或单一裂缝渗透率所能表达,而是两者之和,即 $K = K_b + K_f$ 。式中, K_b , K_f 分别为基质渗透率和裂缝渗透率。

经地区岩心统计分析,可得到基质渗透率模型。库车地区基质渗透率 K_b 一般具有如下形式: $K_b = A\phi^B$ 。式中, ϕ 为孔隙度,%; A, B 为待定经验系数。

对于裂缝渗透率,由于裂缝具有不同组合形式,裂缝渗透率有很大差异。对于形状规则的裂缝,可以从理论上推导出计算裂缝渗透率的公式。对于单组裂缝,裂缝渗透率方程为: $K_f = 8.33 \times 10^9 \phi b^2$ 。式中, ϕ 为裂缝孔隙度,小数; b 为裂缝宽度,cm; K_f 为裂缝渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

对于多组系裂缝,渗透率为: $K_f = 4.16 \times 10^9 b^2 \phi$ 。

对于网状裂缝,渗透率为: $K_f = 5.55 \times 10^9 b^2 \phi$ 。

图 3 展示了裂缝性砂岩综合评价结果。图中不但显示了基质孔隙度、渗透率,也显示了裂缝孔隙度和裂缝渗透率。

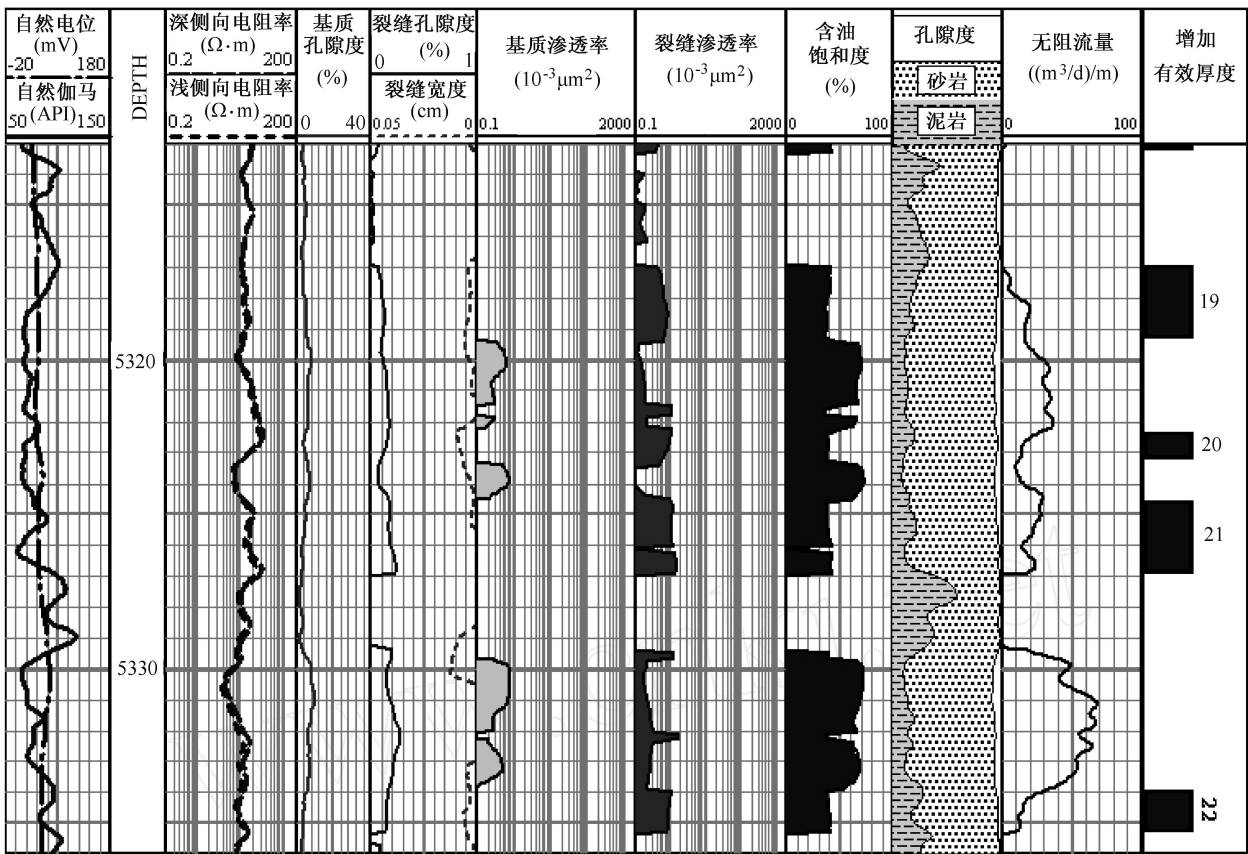


图 3 DN204 井测井综合处理成果

3 应用效果分析

3.1 砂岩裂缝的发育降低了有效储层下限，大大增加了储层有效厚度

砂岩中裂缝发育大大改善了油气储层品质，尤其是对于致密砂砾岩储层来说，裂缝是决定储层能否形成工业性油气聚集的关键。在致密砂岩、砾岩中可以利用井壁成像测井和双侧向测井资料确定裂缝定量参数。

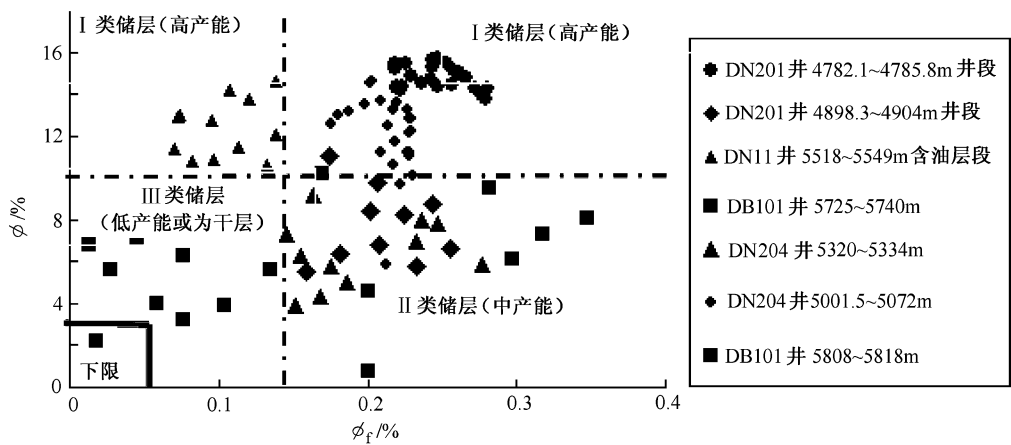


图 4 DN22 井区砂岩总孔隙度 (φ) 与裂缝孔隙度 (φ_f) 交会图

根据试油井段数据，作地层总孔隙度 (φ) 与裂缝孔隙度 (φ) 交会图，对储层进行分类和分级

(图 4)。可以看出,在孔隙度相近情况下,裂缝发育程度提高,油气产能增加,同时裂缝发育使储层类型发生变化,不能使用统一的下限标准来评价储层。研究区由于裂缝发育,降低了有效储层下限值, ϕ 下限为 3%, ϕ 下限为 0.05%。在以前研究中,没有考虑裂缝影响,确定的有效储层孔隙度下限为 6%,该研究考虑到裂缝对储层的影响,裂缝性砂岩储层有效厚度有较大幅度增加(表 1)。

表 1 迪那构造区有效厚度对比

井名	早期有效厚度/m	该研究新增有效厚度/m	有效厚度增长率/%
DN11	21.6	18.1	83.8
DN102	20.1	9.1	47.7
DN22	89.3	31.1	33.7
DN201	65.0	24.3	38.9
DN202	76.6	14.5	18.2
DN204	87.3	28.1	32.2

3.2 帮助预测油气产能,提高油气评价精度

影响油气产能因素很多,除流体性质、地层孔隙度、渗透率和饱和度等因素外^[4~9],就研究区致密砂砾岩来说,裂缝是影响储层品质和油气产能的重要因素,因此在利用测井资料预测油气产能过程中,必须引进裂缝参数,才能提高测井评价精度。从实测资料出发,建立每米无阻流量与孔隙度、渗透率、泥质含量、裂缝宽度的统计关系,相关系数可达 0.8 以上。也可以采用模糊神经网络方法,建立无阻流量与孔隙度、渗透率、泥质含量、裂缝宽度等参数之间的映射关系,然后利用测井资料连续预测油气产能(图 3 中的无阻流量)。得到无阻流量后采用下式预测任意流压下的每米无阻流量。研究区油气产能统计模型为:

$$(Q_{\text{AOF}})_{1\text{m}} = 1.161548428\phi + 44.068070943K - 1.436710044V_{\text{sh}} + 5000.4530061W_{\text{f}}$$

式中, ϕ 为有效孔隙度,小数; K 为渗透率, $10^{-3}\mu\text{m}^2$; V_{sh} 为泥质含量,小数; W_{f} 为裂缝宽度,cm。

对 DN204 井 5300~5347m 井段,在试油前测井预测的天然气无阻流量为 $45.2 \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{d) / m}$,试油作业后用实际测试数据计算的无阻流量为 $37.13 \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{d) / m}$,两者很接近,由此可见上述产能预测方法是可信的。

4 结 语

在岩心刻度基础上,利用测井资料能够定量地确定致密砂岩裂缝参数,包括裂缝宽度、裂缝孔隙度和裂缝渗透率等。砂岩裂缝的发育大大改善了低孔低渗储层品质,引进裂缝参数可以较精细地确定有效储层下限,并预测油气产能,大大加深了对低孔低渗储层的认识。

砂岩裂缝定量评价是一项探索性很强的工作,该研究虽然取得了一些认识,但肯定存在许多不足,甚至错误,欢迎广大同行指正!

[参考文献]

[1] 李军,张超谟.基于 MATLAB 的地质图像处理 [J]. 计算机应用研究,2004,21 (增刊): 491~493.
[2] 祁兴中,刘兴礼,傅海成等.电成像测井资料定量处理方法研究及应用 [J]. 天然气工业,2005,25 (6): 32~34.
[3] 欧阳健,李善军.双侧向测井识别与评价渤海湾深层裂缝性砂岩油层的解释方法 [J]. 测井技术,2001,25 (4): 282~286.
[4] 毛志强,李进福.油气层产能预测方法及模型 [J]. 石油学报,2000,21 (5): 58~61.
[5] 陈元千.现代油藏工程 [M]. 北京:石油工业出版社,2001.
[6] 毛志强.储层产能和产液性质评价中的相对渗透率模型 [J]. 测井技术,1998,22 (5): 311~314.
[7] 管秀强.基于测井信息的油层产能解释模型及其应用 [J]. 江汉石油学院学报,1998,20 (4): 52~55.
[8] Tootle J R. The prediction of well productivity from wireline logs, McAllen Ranch Field [J]. SPWLA, 1979. H
[9] Cheng M L. Productivity prediction from well logs in variable grain size reservoir Cretaceous formation, Republic of Yemen [J]. Log Analyst, 1999, 40 (1): 24~321.

[编辑] 弘 文

CHEN Ke-yong (Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)
HU Yong-zhang (Southwest Petroleum Branch, SINOPEC, Deyang 618000)
WANG Chang-cheng (Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract : Permian Lower Shihezi Formation in Tabamiao Formation is a river facies sedimentary system. Because of its special sedimentation and diagenesis, sandstones and shales are compacted severely with small difference of wave impedance and strong heterogeneity. Traditional wave impedance inversion can not be used to effectively predict the channel sandstones in the area. At present based on GR inversion of lithologic recognition, shale content inversion is used to predict the channel sandstones with satisfied result. Application shows that the prediction of sandstone spatical distribution of the channel sandstone by using shale content inversion is an effective way.

Key words : shale content ; sandstone prediction ; multi-well constrain ; inversion ; river system ; Tabamiao Area

62 Study on Oil Saturation Recovery on Cores by Using Nuclear Magnetic Resonance (NMR)

LI Shuo, GUO He-kun, LIU Wei, SUN Dian-qing, LI Hai-bo (Institute of Porous Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007)

Abstract : In the process of saturation measurement on cores by using nuclear magnetic resonance (NMR). Its original state is changed due to pressure release. Therefore fluid saturated in core samples is patially lost and oil saturation can not be measured correctly by NMR. By studying the soak time, relaxation reagent concentration of the sample, optimal soak time and relaxation reagent concentration are determined. Crude oil coefficient is used to correct the signals of oil loss. A method of third measurement by NMR is first proposed. The relationship is established between oil loss quantity and permeability of core samples and as well as the measured valve of oil saturation. The oil saturation measured on ground is approaching to the measured valve of reservoirs.

Key words : NMR ; Oil saturation ; oil and gas loss ; recovery of oil saturation

66 Method for Logging Data Interpretation of Reservoir Monitoring Tool (RMT)

DAI Jia-cai, GUO Hai-min (Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resource, (Ministry of Education), Yangtze University, Jingzhou 434023)

WANG Jie-yi, TIAN Zhi-hong (Xingjiang Petroleum Administration Bureau, Karamay 834000)

Abstract : Pulsed neutron logging is one of the effective means for oil saturation evaluation in current casing wells. Reservoir monitoring tool (RMT) is a new pulsed neutron spectrometry logging tool. RMT has various logging modes for wide applications. Based on the RMT measuring principle under different measuring modes, corresponding logging data processing methods are put forwards, mathematic models are established for determining remaining oil saturation in reservoirs and field data are processed, the result indicates that the models and process methods are feasible with good effect.

Key words : reservoir monitoring tool (RMT) ; oil saturation ; interpreting method ; carbon-oxygen logging ; neutron lifetime logging

70 Method for Logging Evaluation in Tight Sandstone Fractures and Its Application in Dina 2 Gas Field

GUANG Ying-zhu (Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

LI Jun, ZHANG Chao-mo, XU Sai-nan (Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, (Ministry of Education), Yangtze University, Jingzhou 434023)

Abstract : Growth of fractures is of great significance of low porosity and low permeability tight reservoirs. On the basis of rock core calibration, by comprehensively using the wellbore imaging logging and dual laterolog data, the techniques of image process and numerical simulation calculation are deployed to obtain the width of sandstone fractures and fracture permeability, consequently the permeability of the fractures are estimated. Dina2 Gas Field in Kuche Area is a typical low porosity and low permeability sandstone reservoir, fractures are grown in the reservoir, by which the reservoir quality is greatly improved, the hydrocarbon productivity is raised. Logging data can be employed for quantitatively evaluating the fractures. The result of study shows that the effective low limitation of the reservoir is reduced by the growth of sandstone fractures, its porosity is reduced to 3 % from 6 %, the effective reservoir thickness is substantially raised, the increment is 20 % ~ 20 % in the study area. The quantitative parameters of the fractures are used for predicting the productivity of the reservoirs with well logging method, thus the recognition of the reservoir is deepened.

Key words : logging evaluation ; tight sandstone ; fracture ; low porosity and low permeability ; quantitative evaluation ; Kuche Area

75 Application of Segmented Bond Tool (SBT) Logging Technique for Evaluating Low Density Cementing Quality in Tahe Oilfield

TIAN Xin (China University of Petroleum, Beijing 102249)

SHI Bing-bo (Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Beijing 102200)

ZHANG Cheng-guang (Yangtze University, Jingzhou 434023)

Abstract : The geologic background of low density cementing used in Tahe Oilfield is introduced. The difficulty of cemen-