

微电阻率扫描成像测井方法应用及发展前景

王 璐, 杨长春, 许大华², 迟秀荣³, 谭茂金²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029; 2. 胜利测井公司, 东营 257000; 3. 大港测井公司, 天津 300280)

摘 要 阐述了微电阻率扫描成像(简称FM)测井方法在我国的应用和发展前景。微电阻率扫描成像测井能够对井筒周围地层介质直观、清晰、高分辨率地成像,有助于解决当前测井技术面临的三大地质难题:砂泥岩薄互层储层的有效划分,裂缝性油藏的裂缝和储集性能分析,复杂岩性油藏的参数评价。但也存在测速慢、费用高、定量解释效果差等不足。国际三大测井公司在这方面的研究起步较早,并取得了重要的成果。且早已投入商用。我国在这方面的研究也有很大进展,在未来的发展中,应针对一些理论和技术上的难点分别突破,尽快推出更加适合我国地质特征的微电阻率扫描成像测井仪器和解释手段。

关键词 微电阻率扫描成像测井, 电流聚焦, 储层评价, 发展前景

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2005)02-0357-08

Application and prospect of the formation microresistivity image well logging

WANG Jun¹, YANG Chang-chun², XU Da-hua², CHI Xi-u-rong³, TAN Mao-jin²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Sheng Li Well Logging Company, Dongying 257000, China; 3. Da Gang Well Logging Company, Tianjin 300280, China)

Abstract As a new developed tool of geophysical well logging, Formation Microresistivity Image well logging is able to image distinctly the medium of the formation around the mineshaft, and can help to solve the three geological difficulties faced by well logging technique: 1. efficiently distinguish thin sandstones from thin shales. 2. analysis of fractures and their ability of storage. 3. evaluate parameters in complex reservoir. But it has many shortages: 1. slow logging speed. 2. too expensive. 3. poor result in quantificationally interpretation. The three international companies of well logging initiated this research comparatively early and achieved many results, and have brought out commercial productions. Our country started this research a little late, but has made great progress in recent years. In the future, we should overcome some theoretical and technical difficulties, and put out our better Formation Microresistivity Image tool and interpretation technique.

Keywords Formation Microresistivity Image well logging, evaluate reservoir, prospects

0 引言

地球物理测井就是应用物理学的原理和方法,采用电子仪器在钻孔中进行观测,为勘探开发有用矿产资源提供信息和依据的一种技术。自从1927年法国的斯伦贝谢(Schlumberger)兄弟测量出世界上第一条电阻率曲线,测井技术历经模拟测井、数字测井、数控测井三个阶段后,上个世纪90年代开始

进入成像测井的新阶段。与前几代测井技术相比,成像测井以非线性测量为特点,观测信息的质和量有了极大提高,对于解决当今复杂油气藏的勘探开发难题有重大作用。进入21世纪,成像测井已经成为地球物理测井的主体技术^[1-4]。

成像测井技术,就是在井下采用传感器进行阵列扫描或旋转扫描测量,沿井的纵向、周向、径向大量采集地层信息,传输到井上以后通过图象处理技

收稿日期 2004-07-10; 修回日期 2004-08-20.

基金项目 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW18)资助.

作者简介 王璐,女,1973年生,山东东营人,中国科学院地质与地球物理研究所博士研究生,主要从事地震信号处理和成像以及测井解释方法研究.(E-mail:slwangjun@mail.igcas.ac.cn)

术得到井壁的二维图像或井眼周围某一探测深度以内的三维图像. 成像测井比常规的测井曲线方式更精确, 更直观, 更连续, 分辨率更高, 它的出现为储层评价走向精细、深入提供了条件.

电阻率成像测井最早形成于20世纪80年代中期, 斯伦贝谢公司推出了地层电阻率扫描测井仪器, 揭开了电阻率成像测井技术发展的新篇章. 到了90年代中期, 电阻率成像测井已迅猛发展起来, 斯伦贝谢公司、阿特拉斯公司、哈里伯顿公司等几大国际测井公司都先后研制出了描述井壁地层电阻率特征的微电阻率扫描成像测井仪(FMI、STAR、EM), 并在各油田投入商业服务^[3]. 2000年, 由我国江汉测井研究所自己研制的微电阻率扫描成像测井仪也已成功通过井场测试^[5]. 微电阻率扫描成像测井的主要优点是能提供井壁附近地层的电阻率随深度变化的图像; 图像外观类似于岩心剖面, 可用于识别裂缝, 分析薄层, 进行储层评价以及沉积相和沉积构造方面的研究, 在探测复杂岩性、裂缝性油气藏方面具有独特的优势.

1 井壁微电阻率扫描成像测井仪的测量原理

成像测量的实质是运用一个物理可实现系统来完成对被测物场某种特性分布的 Radon 变换和逆变换. Radon 变换体现为对物场不同方向的投影测量, 反映的是投影方向上某种物场特性分布参数对投影数据的作用变化规律; Radon 逆变换则是运用投影数据确定该物场特性分布参数的过程. 电阻率成像技术解决了没有模式修改的线性反演问题^[6-8].

Radon 变换的数学表达式是定义于平面上的二维函数 $\mu(x, y)$ 沿路径 L 的线积分

$$\int_L \mu(x, y) ds = p_L + e_i.$$

式中 L 为此平面上积分直线 $x \cos \theta + y \sin \theta - l = 0$. 当函数 $\mu(x, y)$ 满足某些弱条件时, 则存在逆变换

$$\mu(x, y) = -\frac{1}{2} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} p(x \cos \theta + y \sin \theta + \epsilon) d\theta.$$

式中, $p(l, \theta)$ 表示 $p(l, \theta)$ 对变量 l 的偏微分.

Radon 变换奠定了成像测量理论和计算的数学基础. 在成像测量时, 应保证采集足够的物场特征数据, 用可靠而实用的计算方法由测量数据快速确定物场特征分布参数.

图1、图2 分别是 Atlas 的 Star 和 Schlumberger 的 Fullbore Formation Micro Image (FMI) 极板结构图. 以 FMI 为例, 它有四个臂, 每个臂上有一个主极板和一个折页极板, 各装有两排24个纽扣电极阵列, 每排12个, 两排间距0.3英寸, 上下电极互相错开, 横向间距0.1英寸; 主极板与折页极板阵列电极间的垂直距离为5.7英寸; 8个极板上共有192个传感器, 都是由直径为0.16英寸的金属纽扣外加0.24英寸的绝缘环组成, 有利于信号聚焦, 使得纽扣电极的分辨率达0.2英寸. 测量时极板被推靠在井壁岩石上, 由地面仪器车控制推靠器极板体和小电极向地层发射同极性的电流, 仪器上的金属外壳作为回路电极. 极板的电位恒定, 极板上发射的电流对小电极的电流起着聚焦作用, 如图3. 从小电极流出的电流通过扫描测量方式被记录下来, 由于极板电位恒定, 回路电极离供电电极较近, 小电极所发射的电流强度随其贴靠的井壁岩石及井壁条件的不同而变化, 主要反映井壁附近地层的微电阻率. 沿井壁每0.1英寸采一次样便得到了全井段细微的电阻率变化. 这密集的采样数据经过一系列校正处理, 如深度校正, 速度校正, 平衡等处理后就可以容易地形成电阻率图像—即用一种渐变的色板或灰度值刻度, 将每个电极的每个采样点变成一个色元, 色彩的细微变化可提供井壁附近的岩性、物性、层理、裂缝和溶洞等地质信息(但它不反映地层实际的岩石颜色).

2 微电阻率扫描成像测井的应用效果

2.1 有效地划分砂泥岩薄互层储层

砂泥岩薄互层, 指的是大量非均质性储层内部造成的很薄的有效储层, 其有效厚度通常小于0.5 m. 在砂泥岩地层中, 泥岩层段中夹有薄砂岩层时, 因为泥岩中粘土具有较高的阳离子交换能力, 呈高电导特征, 所以泥岩的电成像图像通常是暗色图像, 而砂岩是较浅色和浅色图像, 它们的界面就是地层界面, 这很容易识别.

在油田的开发过程中, 有效识别薄储层对提高采收率有重要意义. 微电阻率扫描成像测井提供的纵向分辨率要比常规测井的分辨率高出30~40倍, 它能够识别出5 mm的薄层. 图4为某井的电成像图, 由成像图可以看出在3195~3196.7 m井段, 岩性细、分选好、泥质含量低、物性好, 储层厚度虽不足2 m, 但试油获日产22 t油流.

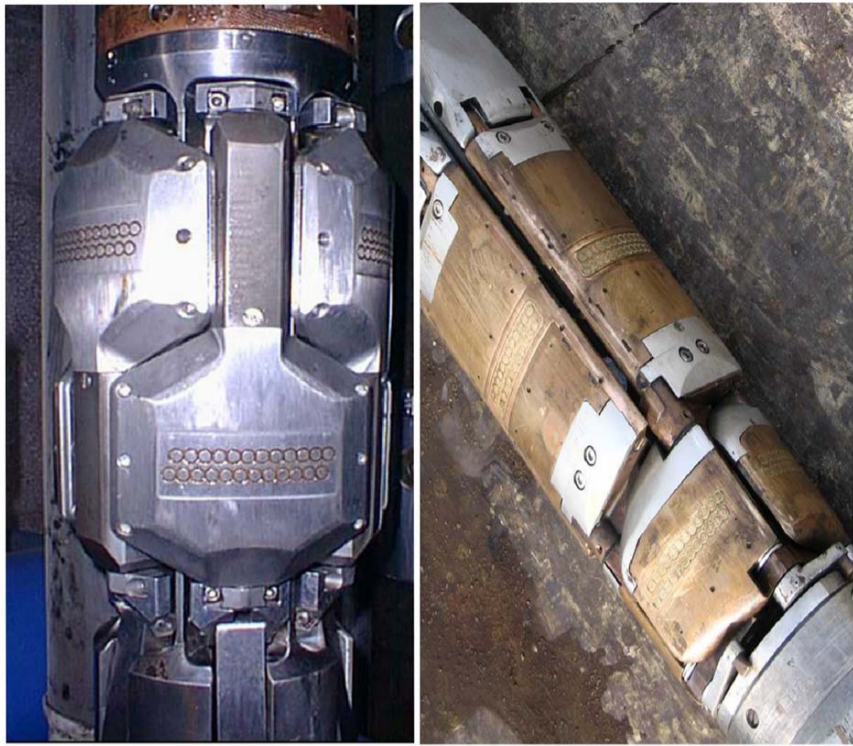


图1 极板结构图

a. 阿特拉斯STAR 极板; b. 斯伦贝谢FM 极板

Fig.1 Configuration of the Plate

a. Atlas 's STAR Plate; b. Schlumberger 'FM Plate

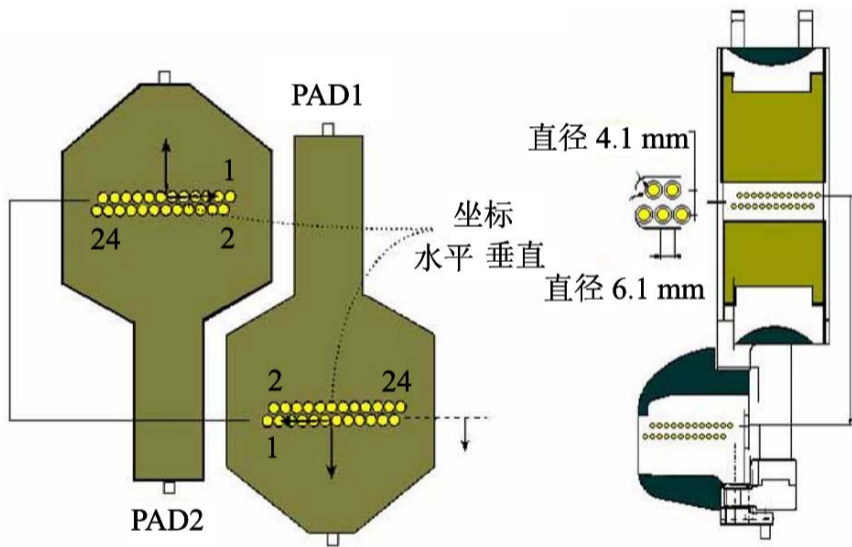


图2 极板电极结构示意图

a. 阿特拉斯电极; b. 斯伦贝谢电极

Fig.2 Configuration of the Plate's Electrode

a. Electrode of Atlas 'Plate; b. Electrode of Schlumberger 'Plate

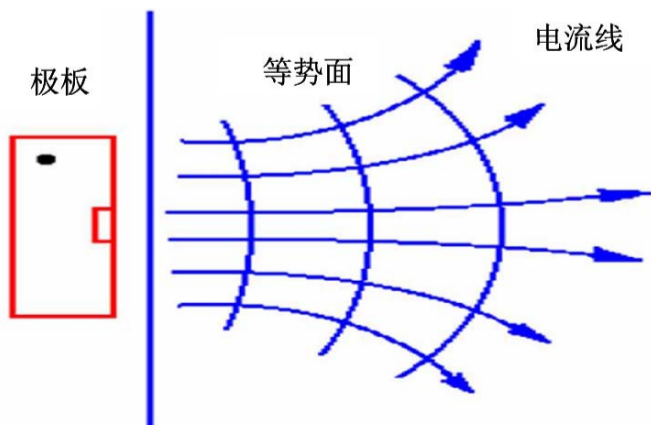


图3 电流分布图

Fig.3 Distributing of the Electric Current

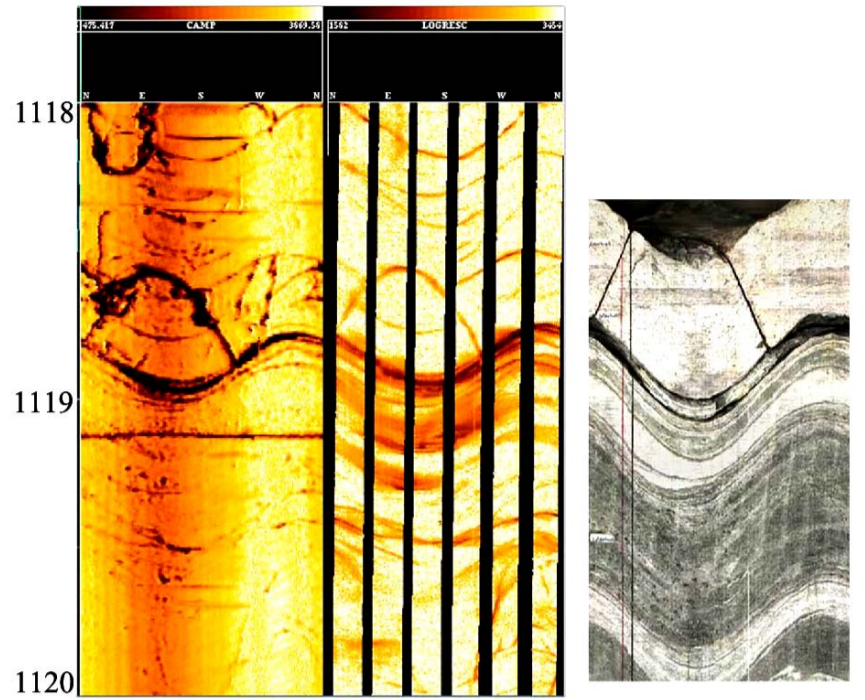


图5 成像图和岩心照片对比

Fig.5 Comparison between image and picture of a core



图9 阿特拉斯新型电成像仪

Fig.9 The New Earth Imager from Atlas

2.2 有效地判断裂缝性油藏的裂缝和储集性能

对于古生界, 下古生界发育的大量碳酸岩非均质地层; 各类硬地层, 老地层形成的裂缝性储层; 各类火成岩、花岗片麻岩、泥岩、低孔低渗灰质胶结硬砂岩等, 进行裂缝系统分析和储集性能分析是常规测井技术面临的一大难题. 微电阻率扫描成像测井所生成的高分辨率、全井眼覆盖图像是井壁缝洞的直接成像结果, 因此在识别裂缝方面有独到的优势^[10], 是确定井壁上裂缝发育情况和定量计算裂缝参数(裂缝张开度、裂缝面孔隙度、裂缝线密度、裂缝长度)的理想工具. 图5 是电成像图与岩心照片的对比, 可以看出电成像图与岩心照片非常接近. 井壁上的裂缝通常有两种: 一种是能够形成储层的天然裂缝, 另一种是不能形成储层的诱导缝. 诱导缝成因不同, 特征也不完全相同, 常见诱导缝有钻井过程中钻

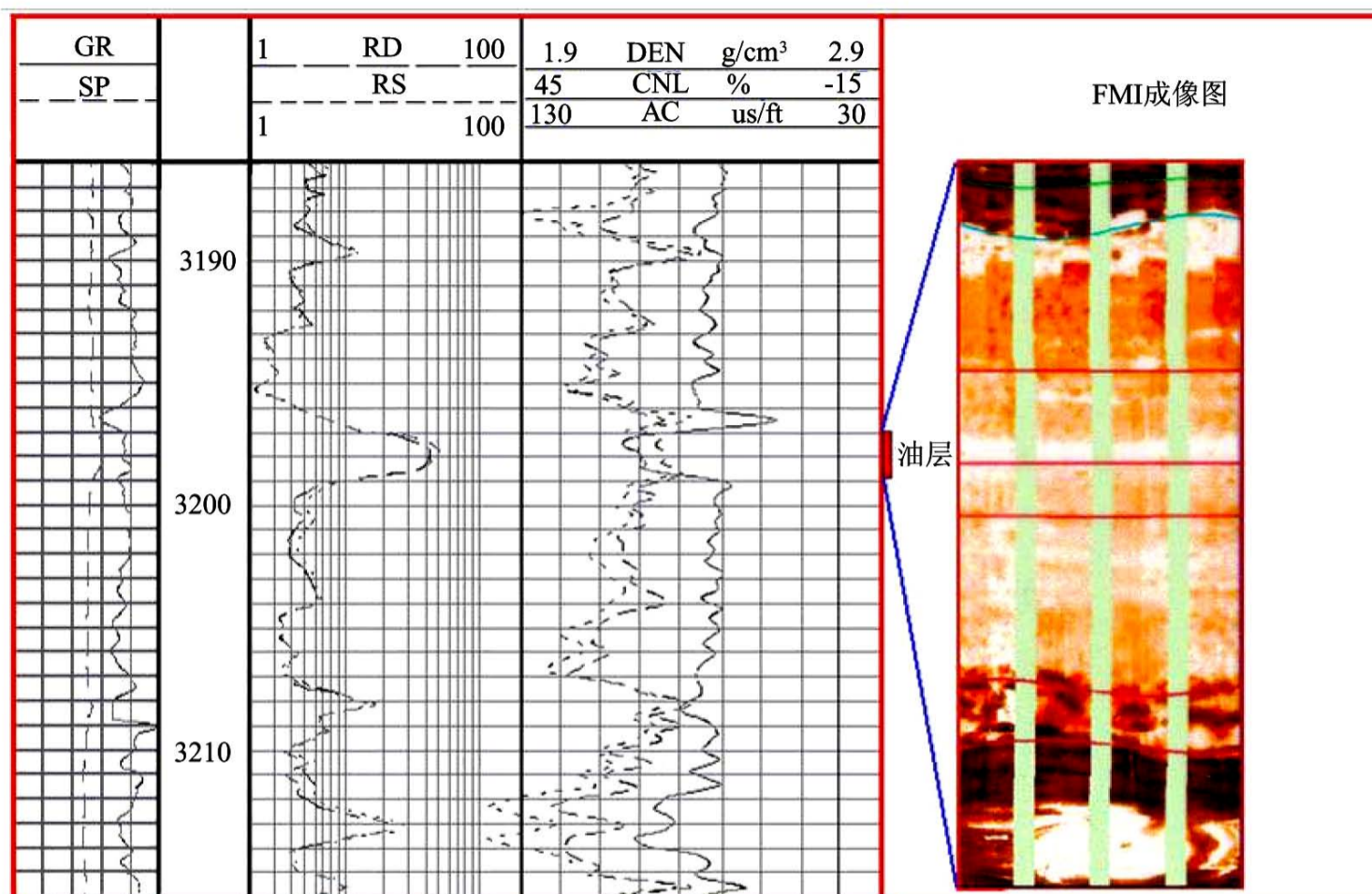


图4 FM 电成像用于薄储层评价

Fig.4 FM Used to Evalute the thin Reservior

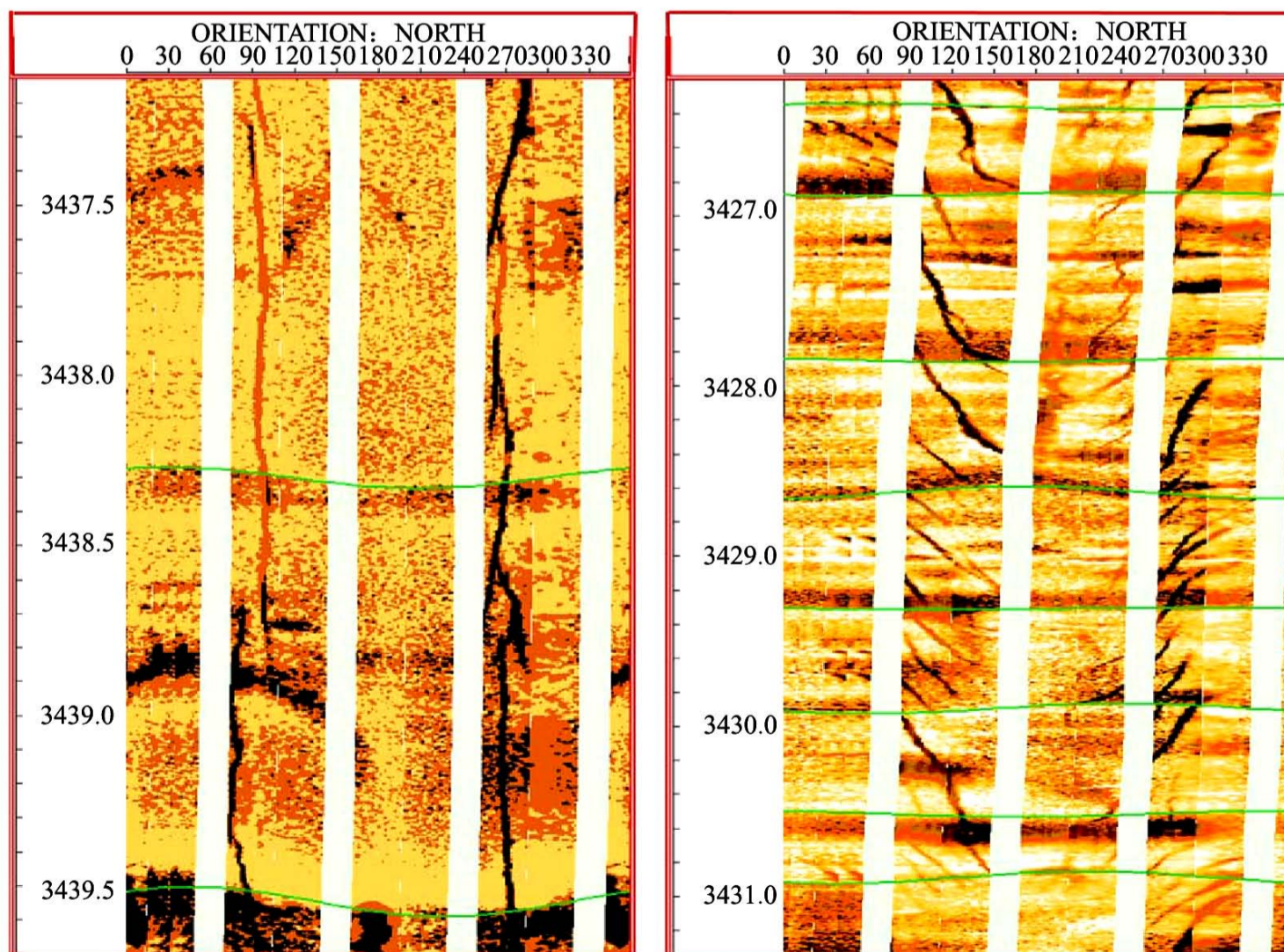


图6 诱导缝

Fig.6 Induced fracture

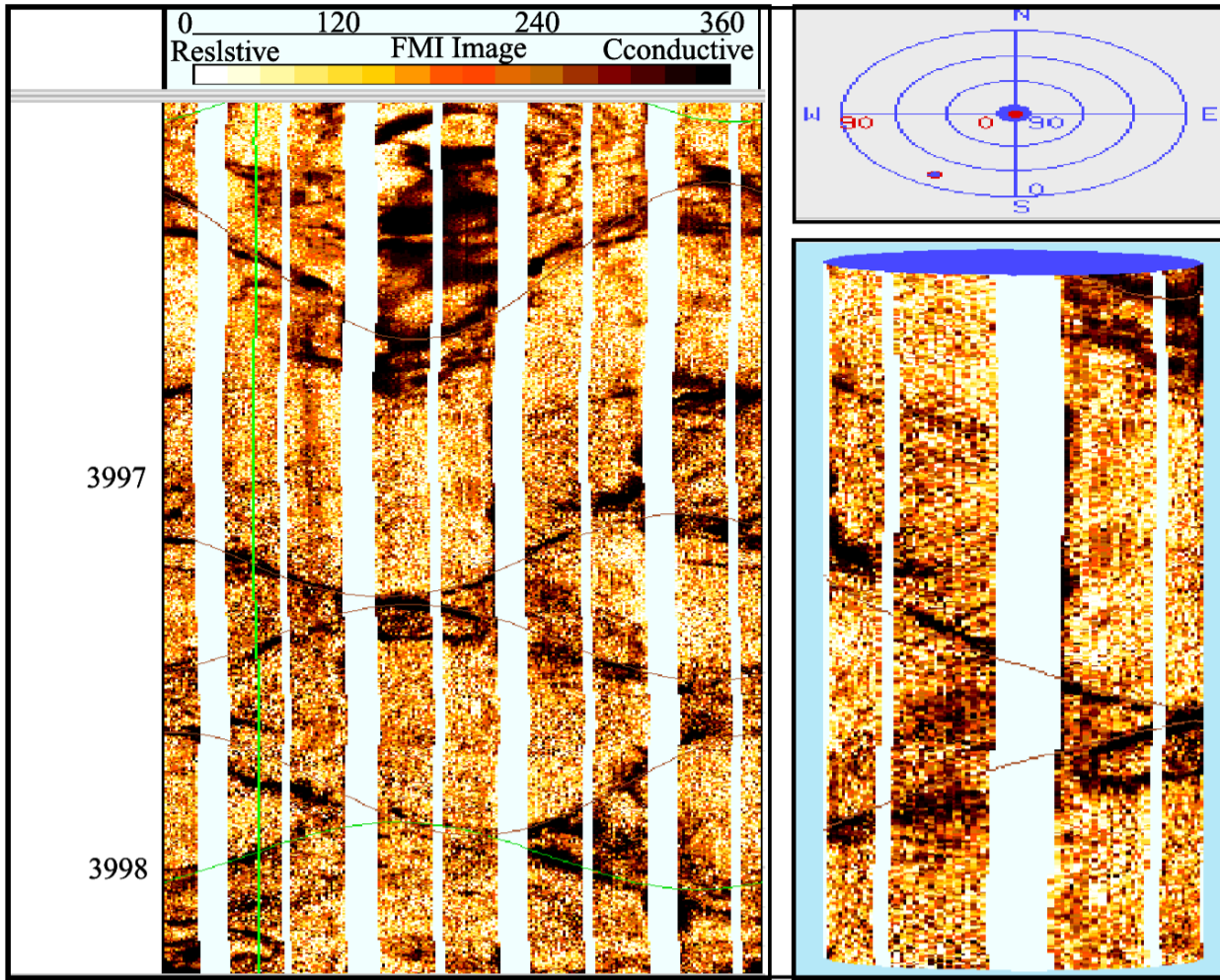


图7 膏岩中的裂缝
Fig.7 Fracture in gypsolith

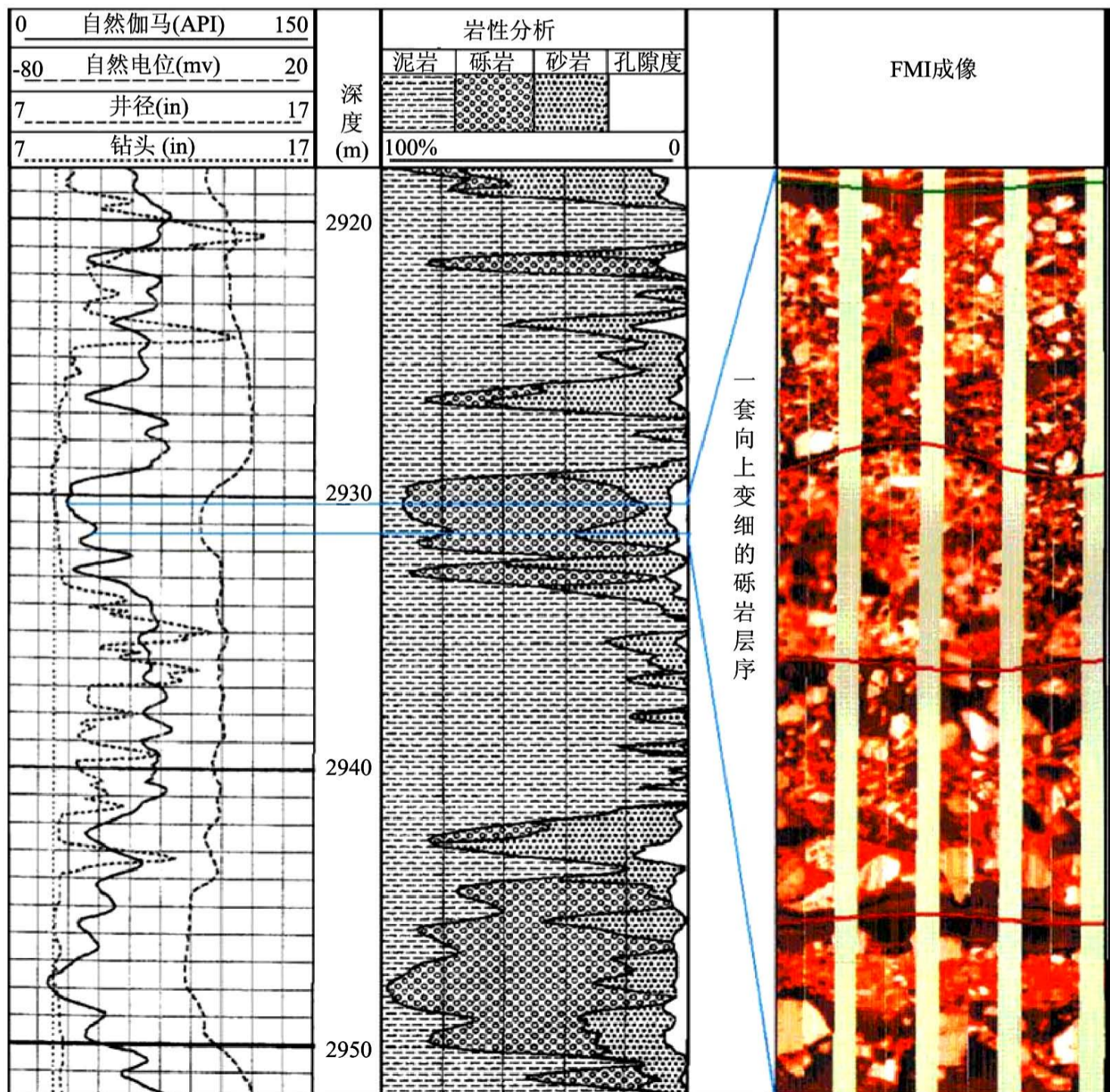


图8 砂砾岩地层测井评价图
Fig.8 FMI Used to Evaluate the Gluterite Information

具机械振动形成的诱导裂缝、重钻井液和地应力不平衡造成的诱导缝、应力释放形成的诱导缝(图6)。

天然裂缝和诱导缝的形态和特征有三方面区别:天然裂缝面不规则,缝宽变化大,诱导缝反之。

诱导缝的延伸不大,深侧向电阻率下降不明显。

诱导缝只与地应力有关,故排列整齐,规则性强,而天然裂缝受多期构造运动形成,又遭受地下水侵蚀,分布不规则^[10-13]。

图7为利用微电阻率扫描成像图进行的裂缝识别。

2.3 复杂岩性油藏参数的正确评价

复杂岩性油藏常指快速堆积的砂砾岩非均质储层,以及沉积盆地中形成的各类火成岩非均质地层。砂砾岩地层岩石结构复杂、储层非均质性强,用常规测井资料判断砂砾岩储层的含油性是测井资料解释评价中的另一难题。利用成像资料对该种地层进行测井评价能取得较好的效果。图8为利用微电阻率扫描成像测井资料进行测井评价的实例,经过分析常规测井资料与直观的成像资料,测井解释人员认为2 544 ~2 559 m井段为油气层,该井经测试在2 545.3 ~2 558.1 m段,日产油120 t,日产气 $8\,712 \times 10^3$ m³,证明了资料解释得比较正确。

2.4 精确地进行岩心归位

中国大陆科学钻探工程是“九五”国家重大科学工程项目,也是国际大陆钻探计划项目之一,测井是科学钻探的重要组成部分和关键技术之一。测井以一个固定的间距连续测量,采样是无选择的,因而是无偏向的、客观的。而岩心收获率一般达不到100%,选择性采样是常见的。未取到岩心的井段,只能依赖测井提供的原位测量信息,恢复岩性和构造剖面。此外,由于未采用定向取心技术,不知道岩心在井内的方向,会影响岩心的应用价值和科学目标的实现。利用测井资料可以进行岩心的定深和定向,实现岩心的空间归位^[16,17]。常规测井资料和岩心对比常存在很大误差,取心收获率低时尤为明显。STAR的电成像资料与声成像和岩心扫描图像的对比,再次说明了微电阻率扫描成像测井在探测岩心上需仔细查看才能发现的微裂隙等方面的优势。该井利用微电阻率扫描成像结合声成像、岩心扫描图像和常规测井资料科学准确地恢复岩心空间位置,完成了长井段(CCSD-MH孔100 ~2 000 m)的岩心深度和方位测井归位,深度误差小于0.5%^[18]。

3 微电阻率扫描成像测井的新进展

我们正在使用的微电阻率扫描成像测井仪,由

于极板发射的电流要通过泥浆回到仪器外壳,所以不能在非导电泥浆(通常指油基泥浆)充满的井筒中使用,使得微电阻率扫描成像测井的应用受到一定限制。因此,开发出能用于非导电泥浆的微电阻率测井技术显得十分迫切,世界各大测井服务公司均在努力开发这类仪器。斯仑贝谢公司1997年将油基泥浆电阻率成像仪(OBM)的研制作为地层评价和开发项目的首选。这种仪器开发的关键技术是解决成像电极与井壁间在高阻抗下的测量问题。斯仑贝谢的科学家和工程师经过四年攻关,设计出了独特的成像极板和相关电子线路,经过多次试验和改进,2001年OBM仪器正式推向市场。仪器有四个极板,安装在相互正交的四个臂上。在每一个极板上,电流电极之间安放有五对测量电极。从每一个极板上测得的五个R_w值可被用于将井壁处的地层电阻率表示为五象素宽的图象。电压测量电极纵向和横向间距分别为0.4 in(1 in=25.4 mm),因此它给出的象素的正常尺寸为0.4 in ×0.4 in。在2003年测井分析家年会上,贝克阿特拉斯公司推出了该公司自行研制的油基泥浆电阻率成像测井仪——Earth Imager。仪器使用现有水基泥浆成像测井仪(声波成像仪和电阻率成像仪)的托架设计和导向系统。六个独立的铰链极板托架保证仪器即使在大斜度井或水平井中也能保持居中测量,每块极板上嵌八个传感器(电扣),电扣间距8.5 mm。其极板结构如图9,该仪器在国内尚未投入使用。

最近,中国海洋石油公司研制成功的八臂微电阻率扫描成像仪是世界上第一支有八个独立活动推靠臂的微电阻率扫描成像仪,开发了24钮扣电极极板技术。

4 微电阻率扫描成像测井技术的不足及未来发展方向

自90年代初以来,我国大庆、胜利、中国石油、中国海洋石油、中原、大港等多家测井公司相继从Atlas和Hallberton公司引进了多套微电阻率扫描成像测井仪器,Schlumberger公司也用FMI多次为各油田提供技术服务,我国自己研制的仪器也已投入商业服务。通过在刻度井中的测量结果显示,微电阻率扫描成像测井提供的地层信息与真实地层情况符合率达到80%以上。在各油田进行的油气勘探开发测井服务中,据不完全统计测井约1 000余口,多数油田见到了明显的经济效益,在陆上和海域发现了一批复杂油气田,探明数亿吨石油储量^[17],同时

也存在一些尚未弄清楚的问题,归根结底这是研发投入不足的结果。

在微电阻率扫描成像测井迅速发展的同时,有些专家提出这种测井方法能否成为电缆测井的核心方法的问题。一种方法能否成为测井的核心方法,需要具备一些基本条件。首先,在原理上它要在实践中被证明能够有效地解决测井地层评价的基本问题,如孔隙度、渗透率、饱和度、以及储量和产能评价等提供准确的信息。其次,在作业上要有较高的测井速度,仪器易于操作,资料易于解释。最后,在经济上要符合油田公司的成本要求,测井公司也要能够获取合适的利润。微电阻率扫描成像测井技术在国际上尚未成为电缆测井的核心方法,除了有成熟晚、应用历史短,技术知识普及程度较低等原因外,也有当前其自身存在的一些缺陷,例如:

(1) 目前在国内的应用还大部分停留于定性解释阶段。虽然斯伦贝谢测井公司提供了定量解释软件^[10],包括计算孔隙度大小及孔隙频率分布,裂缝参数、溶孔参数^[23-25]、渗透率等。国内的一个电成像处理软件(Porodist 2.0)也能进行孔隙度和渗透率分析。但是,目前微电阻率扫描成像测井技术还不能提供饱和度信息,当然更无法提供储量和产能信息^[29-31]。

(2) 微电阻率扫描成像测井与常规孔隙度测井相比,测井速度非常慢。

(3) 由于微电阻率扫描成像测井的前期研发投入非常高,所以仪器的价格和作业费用相应较昂贵。

(4) 我国上世纪90年代初从国外引进的微电阻率扫描成像测井仪用于勘探有时效果不是很理想,这是因为,西方研究的成像测井仪器是针对地层条件简单的高产油气藏设计的,用于我国陆相沉积低产油气藏仍有许多困难。所有这些,都影响着这种测井技术的普及和推广。

我们认为,微电阻率扫描成像测井方法向成为核心电缆测井方法靠拢有如下途径,也是该测井方法的重要发展方向:

(1) 开发测速较快、价格较低、专门针对地层孔隙度的微电阻率扫描成像测井仪。结合其本身具有的精度高、纵向分辨率高的优势,可以结合到常规测井系列中去,或取代常规测井的孔隙度测量功能。

(2) 测井仪器集成化是今后测井技术发展的方向和趋势^[40],微电阻率扫描成像测井与流动成像测井方法结合,开发能够识别地层流体以及准确测量饱和度和渗透率的微电阻率扫描成像测井仪,作为

特殊方法使用,要求它具有较大的探测深度、较强的抗干扰能力和稳定性。

(3) 综合应用微电阻率扫描成像测井观测到的信息,发展更加普遍适用的解释处理方法。

(4) 在我国要想普及和推广应用微电阻率扫描成像测井技术。首先,必须深入研究适合我国地质、地层特征的测井解释模型和资料处理方法,充分发挥已经引进或国产的电成像仪器的作用。其次,加快适合我国地质特征的国产电成像测井仪的研发进程,降低仪器成本和作业费用。

5 结 语

微电阻率扫描成像测井技术与其它高新技术一样,其发展从根本上说取决于应用的需求。目前,受国际经济不断复苏的影响,世界各国对石油的需求量稳步增长,致使国际石油市场价格走出低谷、持续升高。各石油公司为了增强复杂条件下的勘探能力和提高开发效益,迫切需要更加精确地了解油气藏各方面的特性,这对测井技术提出了更高的要求。微电阻率扫描成像测井技术随着观测科学和计算机技术进步应运而生,其研究和开发不仅是科学技术发展的必然,同时也为油田合理开发所必需。现有的微电阻率扫描成像测井技术的应用仍然处于迅速发展的阶段,已经为石油勘探工作者准确寻找油气藏带来了极大的便利。而微电阻率扫描成像测井随着研究人员的不断努力和科学技术的不断进步,必将得到进一步发展。成本更低、适用范围更广、操作更方便、成像效果更清晰准确、覆盖率更高的成像测井技术必将成为石油勘探工作者观测地下的方便快捷精确的“照相机”,为我国油田勘探开发过程中的地质和油藏工程难题的解决作出更大的贡献。

参 考 文 献(References):

- [1] 吴锡令. 流动成像测井研究进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2): 272 ~ 276.
- [2] 谭廷栋. 测井高技术的发展与进步[J]. 天然气工业, 1998, 18(1): 29 ~ 32.
- [3] 石油测井情报组编. 测井新技术应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [4] 秦绪英, 宋波涛. 测井技术现状与展望[J]. 勘探地球物理进展, 2002, 25(1), 26 ~ 34.
- [5] 陶果, 多雪峰. 我国地球物理测井技术的发展与战略初探[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 98 ~ 101.
- [6] 郭秀娟, 张志毅, 梁伟杰. 三维电阻率成像新方法及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(1): 118 ~ 122.
- [7] 底青云, 王妙月. 积分法三维电阻率成像[J]. 地球物理学报,

- 2001,44(6):843~851.
- [8] 王大力. 微电阻率成像三维数值模拟[J]. 测井技术,2000,24(4):258~263.
- [9] 肖丽, 范晓敏. 利用成像测井资料标定常规测井资料裂隙发育参数的方法研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(4):559~563.
- [10] 斯伦贝谢公司. 测井解释原理与应用[M]. 李舟波, 潘葆芝等译. 北京:石油工业出版社,1991.
- [11] 徐星, 赵万优. 成像测井在碳酸盐岩储层评价中的应用[J]. 测井技术,2001,25(5):358~364.
- [12] 王鹏, 金卫东. 声、电、成像测井资料裂缝识别技术及其应用[J]. 测井技术,2002,24(增刊):487~490.
- [13] Serra O. Fundamentals of Well-logging interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier. 1984.
- [14] 柯式镇, 孙贵霞. 井壁电成像测井资料定量评价裂缝的研究[J]. 测井技术,2002,(2):101~103.
- [15] 吴文圣. 地层微电阻率成像测井的地质应用[J]. 中国海上油气,2000,14(6):438~441.
- [16] 牛一雄, 潘和平, 王文先. 中国大陆科学钻探主孔(0~2000m)地球物理测井[J]. 岩石学报,2004,20(1):165~177.
- [17] 潘和平, 牛一雄, 王文先. 测井资料提取中国大陆科学钻探PPII孔岩性物性[J]. 工程地球物理学报,2004,1(1):10~16.
- [18] 许大华, 王珺. CCSD的测井深度控制[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2005,30(2):45~48.
- [19] 莫杰. 探测海底油气藏的千里眼——第五代成像测井仪[J]. 中国海上油气,2000,14(6):438~438.
- [20] Eaton P A, Hohmann G W. A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,1987,53(3~4):384~404.
- [21] Zhang Z. Reconstruction of conductivity and susceptibility from the inversion of EM data:Ph.D.thesis[J]. The university of British Columbia.1997.
- [22] Maury V. New borehole imagery techniques: an aid for failure modes and in situ stress analysis and for minimizing drilling incidents. [A]. In SPWLA 40th Ann Log Symp[C]. 1999,5(30):1~13.
- [23] Zoiouki A. Multiwell imaging of reservoir fluids[A]. In The leading EDGE [C].1999,18(12):1371~1376.
- [24] Reid R R. True pay thickness determination of laminated sand and shale sequences using borehole resistivity images logs.[A] In SPWLA 39th. Ann. Logging. Symp[C]. 1998,5(26):1~9.
- [25] Yu G. Analog and numerical modeling for borehole resistivity and acoustic imaging tools[A]. SPWLA 39th Ann Logging Symp[C]. 1998,5(26):1~8.
- [26] Tang X M. Joint interpretation of formation permeability from wireline acoustic, NMR and image log data[A]. SPWLA 39th Ann. Logging Symp[C]. 1998,5(26):1~14.
- [27] 任海容, 杜淑艳, 秦菲莉, 铁勇, 李凤琴. EMI成像测井技术在灰岩裂缝性储层评价中的应用研究[J]. 江汉石油学院学报,2004,26(增刊):64~65.
- [28] 张守谦. 成像测井技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
- [29] 符翔, 高振中. FMI测井的地质应用[J]. 测井技术,1998,22(6):435~438.
- [30] 王爱丽, 伍泰荣, 等. FMI测井在临盘油田的应用[J]. 测井技术,2003,27(增刊):29~32.
- [31] 任建华, 彭美霞. FMI成像测井在江汉的应用效果分析[J]. 江汉石油职工大学学报,2003,16(3):42~44.
- [32] 谭廷栋. 国内外测井技术水平对比[J]. 国外油气勘探,1996,8(6).
- [33] 谭廷栋. 世界测井技术发展方向[J]. 世界石油工业,1996,3(1).
- [34] 谭廷栋, 尚海筹. 未来的中国石油测井技术[J]. 石油勘探与开发,1985,12(1).
- [35] 陈霞, 荆克尧. 测井技术的新进展[J]. 石油科学论坛,1999,6:19~21.
- [36] 李舟波. 概述地球物理测井研究的历史和现状[J]. 长春科技大学学报,1999,测井专辑:1~4.
- [37] 高效增. 石油工业的战略转移和测井的动向(一)[J]. 测井科技,1997,3:1~13.
- [38] 高效增. 石油工业的战略转移和测井的动向(二)[J]. 测井科技,1997,4:1~5.
- [39] 谭廷栋. 油气测井技术发展趋势[J]. 国外测井技术,1999,1:11~14.
- [40] 许新刚, 刘志新, 王大庆. 矿井电阻率成像技术的现状与展望[J]. 地球物理学进展,2004,19(1):052~055.
- [41] 贾文玉, 田素月, 孙耀庭, 等. 成像测井技术与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2000.
- [42] 张焕武, 马恩军, 曹丽, 张宪生. 国外集成化测井技术[J]. 测井技术,2001,25(4):245~249.