

# 裂缝型油气藏勘探评价面临的挑战及发展方向

何雨丹<sup>1</sup>, 魏春光<sup>2</sup>

(1. 中石化国际石油勘探开发公司, 北京 100083; 2. 中油国际海外研究中心, 北京 100083)

**摘要** 裂缝型油气藏, 即致密砂岩裂缝、碳酸盐岩裂缝、泥岩裂缝、火山岩或变质岩裂缝等储层形成的复杂油气藏, 已经成为国内外油气勘探开发的焦点, 常规勘探理论和方法在裂缝型油气藏评价中面临许多挑战, 常常显得无能为力. 本文从裂缝型油气藏储层评价出发, 分析各种常规预测裂缝有利发育带方法的优势和局限性, 提出裂缝性油气藏勘探评价新理论新方法的基本出发点和思路, 并给出了具体的应用实例.

**关键词** 裂缝型油气藏, 测井, 地震, 构造应力场, 储层评价

**中图分类号** P631      **文献标识码** A      **文章编号** 1004-2903(2007)02-0537-07

## The present situation and research direction of evaluation methods in fracture type reservoir

HE Yu-dan<sup>1</sup>, WEI Chun-guang<sup>2</sup>

(1. Sinopec International Petroleum Exploration & Production Corporation, Beijing 100083, China;

2. CNPC International Research Center, Beijing 100083, China)

**Abstract** In recent years, Evaluation of fracture type reservoir, namely dense sandstone fracture, carbonate fracture, mudstone fracture, volcanic fracture or metamorphic fracture etc, is one of the focuses of oil and gas exploration. The conventional reservoir evaluation methods face the challenge in fracture reservoir. Based on the research of the evaluation methods of fracture reservoir, the advantage and disadvantage of conventional methods to predict the favorable fracture zone is reviewed in this paper. According to the advancement of the research, the new idea in the special reservoir evaluation is discussed. Some examples were presented.

**Keywords** fracture type reservoir, well logging, seismic, structural stress field, reservoir evaluation

### 0 引言

随着全球油气勘探程度的提高, 裂缝型油气藏已经成为一个重要的勘探新领域. 常见的裂缝型油气藏有: 致密砂岩裂缝型油气藏、碳酸盐岩裂缝型油气藏、泥岩裂缝油气藏、火山岩裂缝型油气藏和变质岩裂缝型油气藏. 在国内, 东部地区的大多数油田具有油藏非均质性严重、低渗透、油藏类型复杂等特点. 这些油田中, 裂缝往往十分发育. 非均质、断层和裂缝的交互作用形成大小不等的死油气藏, 使得剩余油分布复杂, 开发难度加大, 采收率降低. 同时, 西南部的油气资源主要聚集在碳酸岩裂缝性油气藏中. 除此之外, 我国还存在大量的泥岩裂缝性油气

藏. 这些都表明, 我国的裂缝性油气藏上蕴含着巨大的调整挖潜能力. 裂缝性油气藏在国际市场上也炙手可热, 目前, 中国正积极实施跨国油气勘探“走出去”战略, 伊朗扎格罗斯盆地碳酸盐岩的裂缝性油气藏勘探, 也门盆地基底变质岩的裂缝性油气藏勘探等都是中国海外油气勘探开发市场不断扩大的见证, 海外裂缝性油气藏资源也将成为我国新增油气储量的重要来源. 因此, 开展裂缝预测技术对我国具有非常重大的现实意义.

复杂的储层岩性、物性的非均质性以及储集空间复杂多变的分布规律等是裂缝型油气藏的一般特征, 油气藏的这些复杂性导致常规的勘探技术和方法在识别裂缝性储层时无能为力, 给储层评价带来

**收稿日期** 2006-12-08; **修回日期** 2007-02-05.

**作者简介** 何雨丹, 女, 1978 年生, 汉族, 安徽人, 2005 年毕业于中国石油大学地质资源与地质工程专业, 获博士学位, 主要从事国际勘探项目管理及测井方法研究. (E-mail: ydhe@sipc.com)

极大的困难.准确预测裂缝发育带是储层评价的前提,对裂缝型油气藏识别起着举足轻重的作用.裂缝型油气藏给储层评价工作带来许多困难和新的挑战.本文系统论述了各种常规勘探技术和方法预测裂缝发育带的优势和局限性,提出了裂缝型油气藏储层预测技术的新理论新方法的思路,并展示了这些方法技术成功应用的实例.

## 1 裂缝型油气藏常规评价方法及其局限性

### 1.1 常规测井方法识别裂缝

利用测井资料定性识别并评价裂缝是行之有效的办法,在油气藏勘探工作中得到广泛的应用<sup>[1~8]</sup>.裂缝的存在会导致某些常规测井曲线产生以下的异常响应<sup>[9~13]</sup>,这是利用常规测井曲线识别裂缝的基础.

(1)裂缝发育段在电阻率曲线上的特征取决于裂缝的产状、密度、长度、充填与否及充填物类型、地层流体类型及泥浆侵入深度等多种因素.高角度裂缝、垂直裂缝的深浅侧向电阻率明显降低,并出现深浅侧向之间相对增大的准“正差异”现象,低角度裂缝也使深浅侧向读数降低,形状尖锐,一般显示相反的准“负差异”现象;网状裂缝的深浅侧向读数更低,也存在差异现象.微侧向测井采用贴井壁测量.在裂缝发育段,当极板接触裂缝,电阻率曲线出现低阻异常,往往表现为以深侧向为背景的针刺状低阻突跳.

(2)从理论上讲滑行波沿岩石骨架传播速度大,故纵波首波的时差曲线一般不反映高角度裂缝,但实际裂缝系统是比较复杂的,因绕射和反射将会使声波时差增大甚至出现周波跳跃.水平裂缝往往使纵波首波时差增大;当裂缝发育时,由于首波能量严重衰减而产生周波跳跃.

(3)测量探头接触到的裂缝会造成密度测量的尖锐低值,密度补偿曲线则具有明显相反的高值,这反映了裂缝造成井壁不规则的程度.在致密基岩段,中子孔隙度曲线成一条平直直线.若中子测井仪探测范围内有裂缝存在,则将对中子孔隙度测井产生贡献,尤其裂缝内充填水或者油时,变化更突出,会导致中子孔隙度变大.

(4)与井壁相切割的高角度裂缝造成井壁附近岩石强度降低,形成沿裂缝走向的跨塌,双井径曲线出现一个方向井径大于钻头直径、另一个方向井径接近于钻头直径的椭圆现象.在常规测量的单井径曲线上同样存在裂缝发育处井径较致密层扩大的现

象.

根据以上裂缝发育段在常规测井曲线上的响应特征,利用岩心资料提取并标定测井响应,同时考虑到不同测井曲线值在量纲及数量级上的差异,对它们进行归一化处理,求取每种测井响应的模糊概率,最后用多种测井响应的联合模糊概率来预测裂缝发育段.实际应用证明了该方法在一定程度上的可行性.

常规测井技术识别裂缝方法,可以比较清楚的识别裂缝发育层段和产状,也可以进行裂缝性储层内流体类型的识别.但是仅仅能够在尺度有限的剖面上识别裂缝,通常对平面上预测的约束力不够,更不能准确地从空间上对整个油气藏的裂缝发育带进行预测.

### 1.2 地震技术预测裂缝储集层发育带的方法

反射波的产生是由于反射界面两侧岩石物性的差异造成的,岩石中的裂隙会引起岩石物性的各向异性,同时也会引起地震反射波的各向异性特征.理论研究表明,垂直裂隙会产生地震波传播的各向异性,分析裂缝引起的地震波各向异性是利用地震资料检测裂缝的重要内容之一.有效地描述裂隙储层取决于准确地确定裂隙的方位分布和连通性以及与储层非均质性的空间关系.裂隙储层地震响应除了与裂隙密度、形状、饱和流体有关,还与岩石本身的岩性有关.因此,裂隙储层的地震响应是复杂的.如果不了解裂隙参数(裂隙密度、所含流体、及形状)与储层本身岩石物理性质的关系以及裂隙储层的地震响应特征,就无法较准确地利用纵波地震资料最大限度地检测裂隙的分布.

地震反演技术在裂缝预测中得到较多的应用<sup>[14~18]</sup>,比如地震属性提取、相干分析等.这些地震属性分析预测的可信度取决于地震资料品质的好坏,在发现断裂带和地震相的划分上有优势,但对于裂缝性储层预测的效果往往受到限制.

### 1.3 构造应力场预测裂缝方法

构造应力场可按空间区分为全球、区域和局部构造应力场;按时间区分为古构造应力场和现今构造应力场;按主应力作用方式区分为挤压、拉张和剪切构造应力场.对于不同的研究对象和研究目的,构造应力场研究的目标也不尽相同<sup>[19]</sup>.其中,最多用于地震机制研究以及岩石圈运动的动力学研究<sup>[19~28]</sup>.构造裂缝产生于地质历史时期的古构造应力场当中,因此古构造应力场的作用强度和方向决

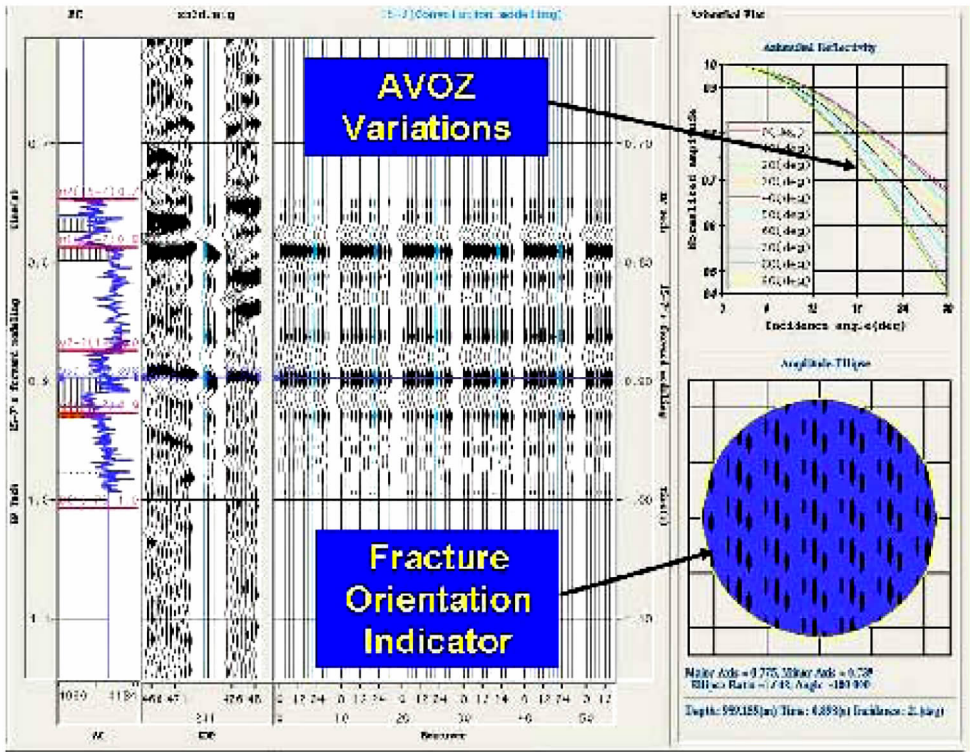


图1 地震波场数值模拟裂缝的方向、密度变化所引起的地震响应特征

Fig.1 Seismic characteristics aroused by different directions and density of fracture in seismic waves field modeling

定了当时产生的构造裂缝的产状、密度等发育特征。对于油气成藏来说,裂缝发育区带为油气运移提供通道,为油气聚集提供储集空间,是非常有利的油气聚集区。构造应力场的发展变化与油气藏的保存或破坏也有着直接关系;包括油田开发以及钻井工程作业过程中,构造应力场的影响作用也是不可忽视的。构造应力场的研究广泛地应用于矿山和油田等作业区以及板内变形的研究,特别是在构造应力场数值模拟方面,已经在国内若干油田进行了多种类型储层裂缝发育区带的预测。

## 2 裂缝油气藏勘探新理论和新方法的基本思路

由于裂缝性储层复杂岩性、物性及储集空间多变的分布规律,采用传统的勘探技术和方法评价这些复杂油气藏无论从理论上并不完善,实际应用效果也不理想。对这些油气藏的评价,将来的发展方向应当是建立在勘探新技术基础上改变原有方法,发展精细模型和全新方法。

### 2.1 成像测井新技术

识别裂缝最直观、准确性最好的测井资料是成像测井资料,以前因为其价格昂贵而不能被普遍采用。随着近几年技术的不断发展,逐渐得到广泛的应用。另外,丰富的常规测井资料用于识别裂缝也有其数据量大和容易获得等优势。成像测井资料可以较好地描述和预测裂缝-孔隙性储层。结合常规测井解释对各种岩性的识别、裂缝孔隙度、产状的预测结果,以及录井取芯资料互相印证。目前,成像测井识别裂缝技术已经得到较为广泛的应用<sup>[29~36]</sup>,并且取得了很好的应用效果。

成像测井包括微电阻率扫描成像测井、交叉式多极子阵列声波测井、高分辨率阵列感应测井和核磁共振测井等一系列声电成像测井技术,把微电阻率扫描成像和交叉式多极子阵列声波测井结合起来使用能够识别储层裂缝。根据电成像测井综合解释模式识别出井壁附近的裂缝,再依据多极子横波测井资料探测较深和裂缝性地层快、慢横波的分裂来识别裂缝的有效性,从而达到裂缝真伪有效性识别的目的。

### 2.2 地震预测新方法

除了裂隙的方向和密度,裂隙的几何尺寸、大小、延展度也是描述裂隙系统的重要参数,随着对勘探精度的提高,如何利用地震波来估算裂隙大小这个问题逐渐显得重要起来.要解决这个问题,需要新的等效介质理论,这要求在基础研究理论方面要有创新和突破.另外控制流体流动和油气运移的主要因素是中等尺度的裂缝(即米级或厘米级),如何描述这种裂缝系统中的地震波的波场特征、如何预测这种裂隙是地震裂缝检测技术发展过程中的重大基础理论和应用课题.

利用横波分裂现象以及转换波的研究用于探测裂隙型油气储层,纵波资料也成为寻找裂隙型储层的主要信息源之一.目前被采用的新技术新方法包括:利用地震体属性的预测技术、裂缝敏感测井重构曲线预测技术、双正交测线法、方位AVO、方位时差椭圆法、神经网络裂缝综合识别技术等<sup>[37~45]</sup>.

在裂缝研究中,裂隙储层的正演模拟研究非常重要,正演模拟可以帮助我们了解裂隙是如何影响反射振幅和频率随偏移距的变化.利用已有的测井资料和钻井资料,建立研究区内井的地质综合模型和岩石物理模型,通过裂缝储层的正演研究技术,研究裂隙造成的地震波场和振幅的变化特征.正演模拟的结果可以直接提供裂缝储层的理论地震响应特征,通过对这些理论地震响应特征的分析,就可以建立该地区地震响应与裂缝性质之间的关系,并把由此得到的结果直接应用于三维地震资料的解释,这样,利用地震的各向异性特征分析,根据目标储集体的裂缝储层正演模拟研究结果,确定出裂缝可能的定向和分布特征.图1是国外某油田地震波场数值模拟显示裂缝发育状况的模拟结果,可以较为清楚地通过地震响应特征判断该区裂缝发育的方向和发育密度.这种方法对于钻井比较少,缺乏取芯以及成像测井资料的油田区有很重要的应用价值.

### 2.3 构造应力场数值模拟新方法

有多种方法在各个地区裂缝预测研究中得到应用<sup>[25,26]</sup>,其中构造应力场有限元模拟方法应用最为广泛.构造应力场模拟在近三十年来发展迅速,但是国内外大多数有限元数值模拟仅限于弹性模拟,这与实际岩石的塑性变形特征是不相符的.实际的岩石变形,特别是留下构造形迹的岩石变形都是塑性变形.因此,要真实的模拟岩石变形就必须进行塑性模拟.很多人尝试修改流变方程参数来模拟岩石的流变特征,而可靠的流变学参数是很难获得的,所谓的粘-弹性构造应力场模拟很难实现.

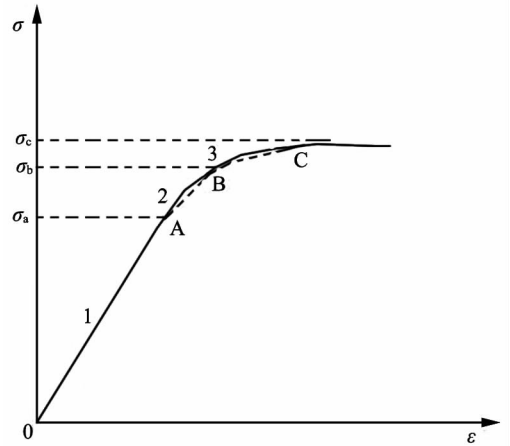


图2 岩石变形的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of rock deformation

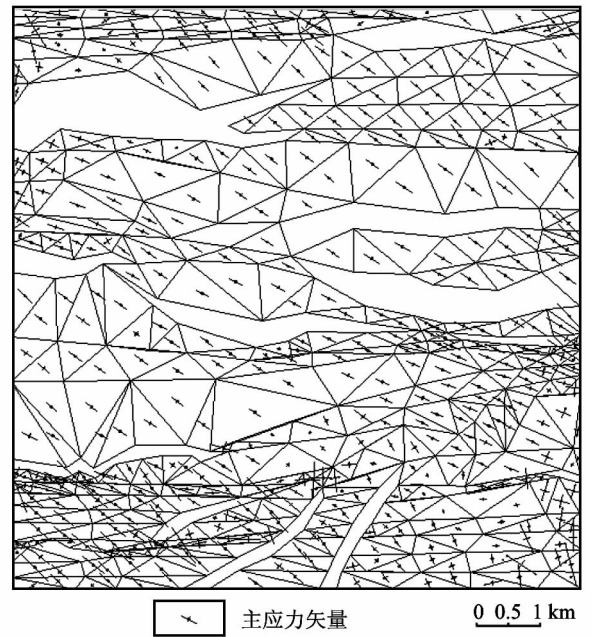


图3 水平主应力分布矢量图

Fig. 3 Vector graph of distribution of horizontal principal stress

目前,较为合理和实用构造应力场有限元模拟方法之一是弹-塑性增量法.经理论证明和实践检验,该方法能够近似的模拟岩石的塑性变形<sup>[27]</sup>,在油气田及矿田构造裂缝预测研究中取得了很好的应用效果<sup>[46~49]</sup>.弹-塑性增量法利用微分原理,采用增量法来模拟岩石的塑性变形,即采用若干个直线段(一般用3~4段)来模拟抛物线形的应力-应变曲线.第一个直线段就是弹性阶段,后几个不同斜率的直线段便是模拟塑性变形(图2).这样可以比较方

便地、近似地模拟材料的塑性变形过程,这是该方法的主要特点之一.该方法的另一个特点是约束条件多,采用各种实测参数,包括构造应力场方向和应力值测试数据、成像测井解释成果、沉积微相划分、构造解释成果等.尽可能真实地模拟实际应力场,并以此为依据进行可靠性较大的预测.模拟过程可分为四个重要阶段:

第一,客观地质模型的研究建立;

第二,将客观的地质模型转化为合理的数学模型;

第三,数值模拟;

第四,模拟结果分析和裂缝发育规律预测.图3是利用上述方法模拟国内某油田一个地层的现今构造应力场特征的模拟结果图件之一.图中主应力的方向和大小通过三角单元中的矢量线的方向和长短来表示,长线为水平最大主应力,与之垂直的短线为水平最小主应力.空白处为断裂带.低应力区域代表构造应力得到释放,为裂缝发育的区.该模拟结果经过验证,比较真实地反映了这一地区的现今构造应力场特征,并且较为准确地预测了有利油气聚集的裂缝发育区带.

### 3 裂缝性油气藏勘探的发展方向

裂缝预测的最大问题在于裂缝系统的复杂性.裂缝有不同类型和不同尺度,大的包括像断层这样的宏观构造,小的可以包括节理、矿脉这样的微观特征,在构造运动的作用下,裂缝也许初时是张开的,后经充填作用而关闭了.采油过程中也会引入许多

次生裂缝,有的是有意而为,比如裂化采油,有的是压力变化,二次采油或三次采油的副产品.另外对运气运移影响最大的往往是那些地震无法分辨的中小裂隙(厘米级).要把裂缝技术用好,提高经济效益,这些问题都需要进一步研究.

要解决这一问题的重要途径是合作研究.首先是多学科的综合研究,将测井、地震和构造应力场模拟研究结合起来<sup>[50~53]</sup>,发挥各自的优势,同时又可以互相印证,提高预测的精度和准确性.也就是说,在新技术新方法的基础上,发展精细模型.图4是国外某油田区域构造应力场分析和FMI测井地应力分析结果,对比发现两种方法分析得到的最大主应力的方向完全一致,很好地起到了由点到线、再到面的预测和验证地应力方向的作用.要想做到这种合作就要求集中多方研究力量,各研究科室通力合作.其次,不但要搞国内合作,还要搞国际合作.只有把国内国外的学术骨干、不同科研单位、工业界不同实体的先进经验结合起来,才有可能攻克这一难题.特别对于海外裂缝性油气藏勘探而言,同国外研究机构的合作就显得尤其重要.一方面将国内成熟的勘探方法应用到海外油气田勘探,另一方面要吸取国际油公司和研究机构的成功经验和先进技术,取长补短.除了地质条件的差异外,海外裂缝性油气藏勘探面临的另一个问题就是资料的采集和获得比较不易,往往存在资料结构不全或品质不好的情况.要进行精细的勘探评价,必须加强技术合作,及时掌握国际前沿的方法技术.

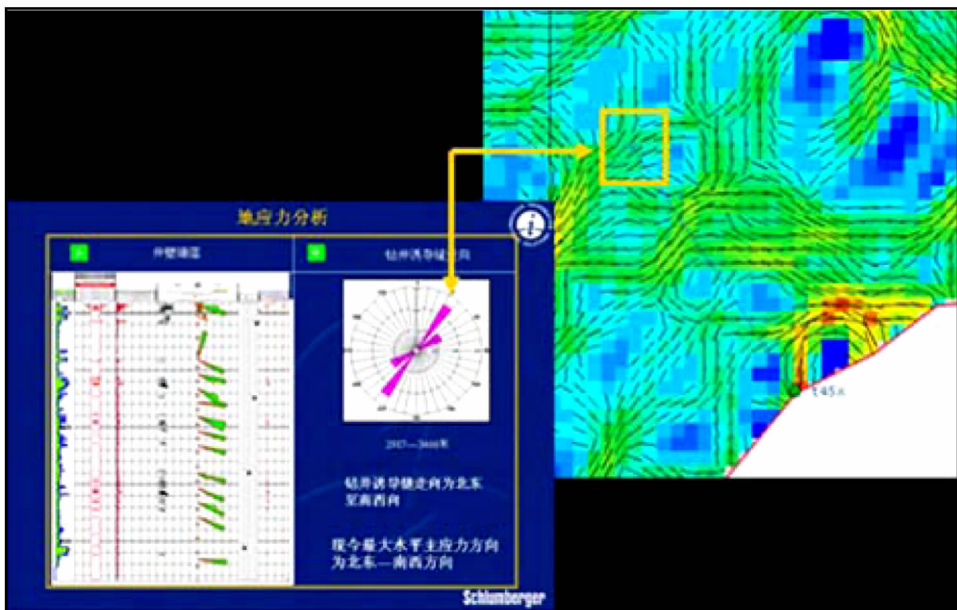


图4 区域应力场分析(右)及其FMI测井地应力分析(左)对比图

Fig. 4 Contrast of analysis of structural stress by original stress field(on right) and by FMI logging(on left)

## 4 结束语

对于常规油气藏勘探方法早已有比较成熟的理论、方法、技术和经验,而裂缝型油气藏常规储层评价方法难以准确地评价储层,要从根本上解决问题,需要发展新技术新方法.成像测井和三维地震属性体的预测技术与常规方法相比具有独特的技术优势,它们以全新的理论,提供了一套全新的信息,通过全新的响应关系,更加直接的确定储层的孔隙度、渗透率和饱和度.弹-塑性增量法构造应力场数值模拟方法可以近似的模拟岩石的变形过程,给出较为可靠的裂缝发育区带预测.基于这些新技术新方法基础上发展精细模型进行综合预测的方法可以减小这些储层相对较大的计算误差,提高利用储层评价的精度.

然而与常规方法相比,由于这些新技术和方法还不成熟,无论从应用的深度和发挥的地质效果上都还远远的落后,需要不断的发展和完善,所以对于裂缝型油气藏当务之急是基于新技术基础上研究和推广全新的方法,并在应用中不断发展和改进,达到最大限度地提高勘探效率的目的.

## 参 考 文 献 (References):

[1] 卢颖忠,黄智辉,管志宁.用常规测井资料识别裂缝发育程度的方法[J].测井技术,2000,24(6):428~432.

[2] 卢毓周,魏斌,李彬.常规测井资料识别裂缝性储层流体类型方法研究[J].地球物理学进展,2004,19(1):173~178.

[3] 马斌,罗明高,李勤良.利用常规测井资料识别低渗透砂岩储层裂缝[J].内蒙古石油化工,2006,(7):131~133.

[4] 潘保芝,张丽华,单刚义,等.裂缝和孔洞型储层孔隙模型的理论进展[J].地球物理学进展,2006,21(4):1232~1237.

[5] 谭海芳,陆桂祥,申梅英,等.利用常规测井资料识别砂泥岩中裂缝的方法研究[J].断块油气田,2004,11(6):81~82.

[6] 何雨丹,肖立志,毛志强,等.测井评价“三低”油气藏面临的挑战和发展方向[J].地球物理学进展,2005,20(2):282~288.

[7] 程芳,宁维林,蔡云,等.利用常规测井资料识别某碳酸盐岩储层层次孔隙类型[J].国外测井技术,2005,20(2)8~13.

[8] 钟淑敏,蔡敦科,王秀娟.应用常规测井资料识别砂泥岩储层裂缝方法[J].大庆石油地质与开发,2005,24(1):98~99.

[9] 史歌,何涛,仵岳奇,等.用正演数值计算方法开展双侧向测井对裂缝的响应研究[J].地球物理学报,2004,47(2):359~363.

[10] 谢然红,肖立志,邓克俊.核磁共振测井孔隙度观测模式与处理方法研究[J].地球物理学报,2006,49(5):1567~1572.

[11] 原宏壮,陆大卫,张辛耘,等.测井技术新进展综述[J].地球物理学进展,2005,20(3):786~795.

[12] 张治国,杨毅恒,夏立显.自组织特征映射神经网络在测井岩性识别中的应用[J].地球物理学进展,2005,20(2):332~

336.

[13] 周灿灿,王昌学.水平井测井解释技术综述[J].地球物理学进展,2006,21(1):152~160.

[14] 刘恩儒,岳建华,刘彦.具有离散裂缝空间分布的二维固体中地震波传播的有限差分模拟[J].地球物理学报,2006,49(1):180~188.

[15] 何瑞武,黄捍东,李群,等.商741井区火成岩地震裂缝预测[J].石油地球物理勘探,2005,40(6):682~687.

[16] 王延光,杜启振.泥岩裂缝性储层地震勘探方法初探[J].地球物理学进展,2006,21(2):494~501.

[17] 周英杰.裂缝性潜山油藏储集层识别与预测[J].中外能源,2006,11(3):21~25.

[18] 张延玲,杨长春,贾曙光.地震属性技术的研究和应用[J].地球物理学进展,2005,20(4):1129~1133.

[19] 万天丰.构造应力场研究的新进展[J].地学前缘,1995,2(1~2):226~235.

[20] 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等.中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J].地球物理学报,2004,47(4):654~662.

[21] 刁桂苓,王海涛,高国英,等.伽师强震系列应力场的转向过程[J].地球物理学报,2005,48(5):1062~1068.

[22] 徐纪人,赵志新,石川有三.青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制[J].地球物理学报,2005,48(4):861~869.

[23] 赖院根,刘启元,陈九辉,等.首都圈地区横波分裂与地壳应力场特征[J].地球物理学报,2006,49(1):189~196.

[24] 刘翠荣.东海西湖凹陷中新世构造应力场数值模拟及油气有利聚集区预测[J].石油实验地质,2002,24(1):73~76.

[25] 张帆,贺振华,黄德济,等.预测裂隙发育带的构造应力场数值模拟技术[J].石油地球物理勘探,2000,35(2):154~163.

[26] 张明利,万天丰.含油气盆地构造应力场研究新进展[J].地球科学进展,1998,13(1):38~43.

[27] 张景和,孙宗顺.地应力、裂缝测试技术在石油勘探开发中的应用[M].北京:石油工业出版社,2001,3~25.

[28] 李淑恩,张绍辉,岳奎,等.构造应力场数值模拟分析技术及其应用[J].油气地质与采收率,2001,8(6):38~40.

[29] 王珺,杨长春,许大华,等.微电阻率扫描成像测井方法应用及发展前景[J].地球物理学进展,2005,20(2):357~364.

[30] 杜彪.盐间非砂岩成像测井裂缝识别方法[J].江汉石油职工大学学报,2005,18(2):38~40.

[31] 孙加华,肖洪伟,么忠文,等.声电成像测井技术在储层裂缝识别中的应用[J].大庆石油地质与开发,2006,25(3):100~102.

[32] 曹正良,王克协,谢荣华,马在田.三种阵列声波测井数据频散分析方法的应用与比较[J].地球物理学报,2005,48(6):1449~1459.

[33] 查恩来,丁凯.成像测井新技术在水利工程中的应用[J].地球物理学进展,2006,21(1):290~295.

[34] 邓小波,聂在平,赵延文,等.用相位感应测井数据反演地层电阻率和介电常数[J].地球物理学报,2006,49(2):604~608.

[35] 谭茂金,赵文杰.用核磁共振测井资料评价碳酸盐岩等复杂性储集层[J].地球物理学进展,2006,21(2):489~493.

- [36] 陆敬安,伍忠良,关晓春,等.成像测井中的裂缝自动识别方法[J].测井技术,2004,28(2):115~117.
- [37] 聂建新,杨顶辉,杨慧珠.基于非饱和孔隙介质 BISQ 模型的储层参数反演[J].地球物理学报,2004,47(6):1101~1105.
- [38] 何建军,贺振华,黄德济.致密砂岩储层裂缝发育带的检测和识别[J].成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(6):713~716.
- [39] 傅红笋,韩波.二维波动方程速度的正则化-同伦-测井约束反演[J].地球物理学报,2005,48(6):1441~1448.
- [40] 陶国秀.潜山油藏多因素神经网络裂缝综合识别技术—以垦利潜山油藏为例[J].油气地质与采收率,2006,13(4):36~38.
- [41] 李琼,李勇,李正文,等.基于 GA~BP 理论的储层视裂缝密度地震非线性反演方法[J].地球物理学进展,2006,21(2):465~471.
- [42] 刘恩儒,岳建华,刘彦.具有离散裂缝空间分布的二维固体中地震波传播的有限差分模拟[J].地球物理学报,2006,49(1):180~188.
- [43] 周英杰.裂缝性潜山油藏储集层识别与预测[J].中外能源,2006,11(3):21~25.
- [44] 黄龙威.东濮凹陷文留中央地垒带泥岩裂缝性油气藏研究[J].石油天然气学报(江汉石油学院学报),2005,27(3):289~292.
- [45] 滕佃波,邢春颖,王赞.基于地震横波分裂理论的火成岩裂缝检测[J].地球物理学进展,2005,20(2):513~517.
- [46] 李淑恩,张绍辉,岳奎,等.构造应力场数值模拟分析技术及其应用[J].油气地质与采收率,2001,8(6):38~40.
- [47] 魏春光,雷茂盛,万天丰,等.古龙~徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟—构造裂缝发育区带预测及对比研究[J].石油与天然气地质,2006,27(1):78~85.
- [48] 张守仁,万天丰,陈建平.川西坳陷孝泉~新场地区须家河组二—四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测[J].石油与天然气地质,2004,25(1):70~80.
- [49] 陈志德,蒙启安,万天丰,等.松辽盆地古龙凹陷构造应力场弹~塑性增量法数值模拟[J].地学前缘,2002,9(2):483~492.
- [50] 景件恩,魏文博,梅忠武,等.裂缝型碳酸盐岩储层测井评价方法—以塔河油田为例[J].地球物理学进展,2005,20(1):78~82.
- [51] 李军,郝天珧,赵百民.地震与测井数据综合预测裂缝发育带[J].地球物理学进展,2006,21(1):179~183.
- [52] 于常青,祁晓明,朴永红,等.联合高分辨率地震和精细测井资料的剩余油气分析[J].地球物理学进展,2005,20(2):302~307.
- [53] 李建良,徐炳高,张筠.裂缝信息的测井识别与高分辨率地震反演[J].测井技术,2006,30(3):213~216.