

# 致密碎屑岩裂缝性储层预测方法综述

张雨晴, 王志章

中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

**摘要** 致密碎屑岩裂缝性油气藏储量在低渗透储层总储量中占很大比例。致密碎屑岩裂缝性储层成为油气勘探开发研究的重要对象。当前,致密碎屑岩裂缝性油气藏勘探开发的最大难点在于如何对储层裂缝的发育程度和分布范围进行预测。准确进行裂缝预测对致密碎屑岩裂缝性储层的油气开发具有重要意义。本文对致密碎屑岩裂缝预测的方法进行了系统分析,从地质分析法、曲率法及构造应力场模拟、地震裂缝识别技术、测井裂缝识别技术和生产动态分析法 5 个方面对当前致密碎屑岩裂缝预测的主要研究方法现状进行了详细阐述,简要描述了各种方法的优缺点和应用条件;结合当前科学技术总体进展,指出致密碎屑岩裂缝预测研究的两个方面的发展趋势:单一的裂缝预测技术需要不断创新、综合多种方法各自的优势进行系统预测。

**关键词** 致密裂缝性碎屑岩;裂缝预测;油气田开发

**中图分类号** TE121

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-7857(2010)14-0109-04

## A Review of Prediction Methods for Reservoirs of Tight Fractured Clastic Rock

ZHANG Yuqing, WANG Zhizhang

College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** Engineering practice shows that reserves of tight fractured reservoirs of clastic rock account for a large proportion of the total reserves of low permeability reservoirs. Their researches are important for exploration and development of oil and gas. An important difficulty in exploration and development of tight fractured reservoirs of clastic rock is how to accurately predict the growth degree and distribution range of reservoir fractures. In this paper, the methods of fracture prediction for tight reservoirs of clastic rock are systematically reviewed, including geological analysis, curvature method and tectonic stress simulation, seismic fracture identification technique, log fracture identification technique and production performance analysis. It is pointed out that there are two development trends for macroscopic fracture predictions of tight reservoirs of clastic rock: the innovation in the single methods of fracture prediction and the systematical engineering method integrating advantages of different single methods for fracture prediction.

**Keywords** tight fractured clastic rock; fracture prediction; oil and gas development

### 0 引言

据统计,中国已探明的低渗透油藏储量约占全国总探明储量的 23%,其中致密碎屑岩裂缝性油藏储量占低渗透油藏总储量的 40%。随着石油工业的飞速发展和对能源的巨大需求,裂缝型储层在油气勘探和开发中不断显示出其重要性。

由于致密碎屑岩石十分致密,原生孔隙在后期的成岩演

化过程中已所剩无几,寻找利于油气运移和聚集的裂缝系统成为低渗透致密碎屑岩储层油气储量预测的关键。致密碎屑岩裂缝性油气藏勘探开发的研究难点在于如何对储层裂缝的发育程度和分布范围进行准确预测。国内外对致密碎屑岩裂缝研究开展了大量工作,研究方法不断创新和发展,取得了许多有价值的研究成果,为实际的油气开发实践提供了科

收稿日期: 2010-05-04

基金项目: 国家油气重大专项(2008ZX05008)

作者简介: 张雨晴,博士研究生,研究方向为油气藏描述,电子信箱:zhangyuqing802@163.com;王志章(通信作者),教授,研究方向为油气藏描述,电子信箱:whx3998@vip.sina.com

学依据。本文对裂缝预测的方法进行综合阐述,分析各种方法的优缺点及适用条件,为裂缝预测方法的进一步研究提供理论基础,有利于推动油气开发效益的不断提升。

## 1 地质分析法

### 1.1 岩心分析法

岩心分析法是一种根据岩心裂缝发育情况对地层中裂缝进行观测的直观描述方法,是一种重要而直接的方法,在工程实践中的应用十分广泛,是裂缝测井和地震研究的基础。如果在岩心或岩屑中发育有裂缝,或者在岩屑中有裂缝充填矿物碎片,则可判明储层中有裂缝存在。通过岩心分析可以对地层中的裂缝进行直接观测和测量,且可确定裂缝张开度、裂缝长度、裂缝面积、裂缝渗透率和孔隙度等裂缝参数。

### 1.2 野外露头调查

研究露头是获得地质构造与裂缝关系<sup>[1]</sup>和确定缝合线、流动通道的最好办法,最细微的裂缝发育详情只有在新鲜露头面才可能得到。观察较大的露头可以获得详细的信息,获取的记录和测量参数与观察岩心得到的结果通常一致。在露头区还应注意观察地层因受到破坏作用而发生的变形,重点对比由于破裂的冲击引起变形的程度,从构造地质图上可以较好地推论破裂的强度。

## 2 主曲率法和构造应力场模拟法

构造面主曲率在一定程度上控制了裂缝发育的密度、方向、宽度和深度。由微分几何学原理或薄板小挠度弯曲理论得到构造面的主曲率,进而对储层进行裂缝预测的方法称为主曲率法。构造应力场模拟法主要是利用有限元和有限差分等数学方法对研究区的构造应力分布情况进行模拟,然后运用岩石断裂力学理论对构造裂缝发育密度与应力分布关系进行定量研究,进而对裂缝发育程度进行预测。这两种方法都是从构造的角度进行裂缝分析及预测<sup>[2]</sup>。

1966年,Price<sup>[3]</sup>根据岩石破裂形成裂缝时表面能不断增加的现象,得出裂缝的发育程度与岩石中的弹性应变能呈正比的结论。1968年,Murray等<sup>[4]</sup>从构造本身的结构特征出发,探讨了构造形变主曲率与裂缝分布的定量关系,用几何方法导出了曲率与裂缝孔隙度、渗透率之间的关系。1984年,Narr与Lerche提出在一定层厚范围内单组裂缝的平均间距与裂缝发育的岩层厚度比值成线性函数关系。1991年,Narr提出了裂缝间距指数法,即用裂缝发育的岩层厚度中值 $T$ 与裂缝间距中值 $S$ 的比值评价裂缝发育程度。

20世纪70年代初,裂缝间距指数法被引入到国内,且被广泛地应用在实际工程中<sup>[5]</sup>。1982年,曾锦光等从构造应力场入手,根据岩石破裂准则开展了定量预测裂缝分布的数值模拟方法的研究。最常用的数值模拟方法是有限元和有限差分方法,有限差分最适合解决模型和实体穿过网格时结点阵列保持静止的问题;有限元模拟方法中的单元可以据实变化,

常用于预测地下构造形态和天然断裂。在预测裂缝分布中,有限元技术远远优于简单的曲率分析技术,不仅能预测塑性变形,而且能预测脆性变化。20世纪90年代,该数值模拟技术研究有了较大进展,文世鹏<sup>[6]</sup>、宋慧珍<sup>[7]</sup>等将二维、三维构造应力场数值模拟和地质基础工作紧密结合,初步形成和发展了一套以有限元数值模拟方法为基础的裂缝分布规律预测方法;综合运用张破裂准则和剪破裂准则进行计算,根据岩石破裂率预测出裂缝发育区域及裂缝发育方位。

1998年,周新桂等<sup>[8]</sup>提出了另外一种数值模拟裂缝的方法——能量法,认为同样厚度具有相对高应变能的岩石比具有较低应变能的岩石有更多的裂缝。丁中一<sup>[9]</sup>、谭成轩等<sup>[10]</sup>通过岩石破裂法和能量法对油田储集层中的构造裂缝发育情况进行了数值模拟,发现岩石破裂法结果与能量法结果互为补充,从而提出了用破裂值和能量值共同定量预测裂缝发育的新方法,即二元法。破裂值代表了裂缝发育的可能性,能量值代表了裂缝发育能力的大小。应用实践表明二元法预测效果相对较好。

此外,F指标法、平面断裂因子法、构造缝综合强度指数法、渗透率异常频率法、异常流体压力斯曲率法、高斯分析法预测泥岩中裂缝,平均整旋角法等方法也丰富了油气盆地中储集体裂缝研究方法。

## 3 地震裂缝识别

裂缝的存在导致地质体的地质属性随着地层方位变化。地震裂缝检测方法是指通过测量地震属性在各向异性主方位上的变化对裂缝予以识别的方法集合。地震资料的空间覆盖范围通常很大,利用其进行裂缝参数的定量计算有很强的实用价值<sup>[11]</sup>。几十年来,横波分裂、纵波裂缝检测、多波多分量探测及垂直地震剖面(Vertical Seismic Profiling, VSP)、属性分析法等多种地震裂缝识别技术均取得长足发展和显著的实践成效。

### 3.1 横波分裂法

由于质点振动沿裂缝走向时传播速度快,沿垂直裂缝走向时传播速度慢,因此横波在通过裂缝系统后会出现快横波和慢横波,即横波分裂。理论和实践证明,单层模型情况下横波分裂参数(快波偏振和快、慢波时差)与裂缝发育方向和裂缝发育强度有一一对应的关系。只要找出快横波的方向,就能准确预测裂缝发育的走向;测量出快、慢横波的层间时差,就能够识别出裂缝发育的强度。张明等<sup>[12]</sup>利用横波双折射现象,采用最小熵值旋转法、正交基旋转法、全局寻优法等方法对裂缝走向、密度进行了预测。横波分裂裂缝检测能够较为精确、有效地预测裂缝,然而横波勘探成本昂贵,横波地震资料的信噪比较低,导致该方法至今未得到广泛应用<sup>[13-14]</sup>。

### 3.2 纵波裂缝检测法

理论研究和实际应用表明,利用地震纵波资料可以较好地定量检测裂缝分布。Mallick等<sup>[15]</sup>发现,在一个固定炮检距处的纵波反射振幅响应,和炮检方向与裂缝走向的夹角存在

近似的周期余弦函数关系。曲寿利等<sup>[16]</sup>将以上关系扩展到反射波速度和炮检方向与裂缝走向夹角的关系中。1996年, Lynn 等通过变化不同方位的振幅,得到了裂隙密度和方位。

近年来国内外研究和应用表明,利用叠前地震数据开展裂缝研究时,频率属性在反映开启裂缝密度和流体信息方面比振幅属性敏感性更强。沿裂缝方向,高频部分吸收衰减得慢,而沿着垂直裂缝的方向,高频部分吸收衰减得快。裂缝越发育,频率沿不同方位角的变化越明显,当裂缝含有油气时,这种差异更加明显。分析由裂缝和所含流体引起的频率方位各向异性,可以有效地检测储层中开启性裂缝的发育状况。纵波(P波)方位各向异性裂缝预测技术是利用地震波在各向异性介质中传播时会发生振幅、速度、传播时间、振幅随炮检距变化(Amplitude Versus Offset, AVO)属性随方位角的变化,检测裂缝(特别是垂直缝或高角度缝)发育的方位和发育密度。AVAZ(Amplitude Variation with Azimuth)裂缝检测方法是根据P波振幅随方位角的周期性变化估算裂缝的方位和密度;VVAZ(Velocity Variation with Azimuth)裂缝检测方法是根据P波传播速度的方位各向异性来估算裂缝的方位和密度<sup>[17]</sup>。Schoenberg<sup>[18]</sup>、Cray<sup>[19]</sup>等利用地震波方位AVO检测裂缝的分布,取得了良好的效果。AVO属性参数的方位差异值的正与负反映了裂缝延伸方向,差异值大小则反映了裂缝的发育强度。

### 3.3 垂直地震剖面法

VSP是一种井中地震观测技术,即激发震源位于地表,在井中不同深度进行观测,研究井附近地质剖面的垂直变化。VSP较地面地震信噪比、分辨率更高,波的运动学和动力学特征更明显。利用VSP资料检测裂缝的方法很多,目前使用较多的是横波(S波)源四分量技术,使用正交偏振的S波震源,利用Alford旋转分离快、慢波;这种方法不仅能检测裂缝的方位,还可以检测裂缝的密度<sup>[20]</sup>。此外还有一种二分量VSP方法,是通过检波器旋转分析以及偏振分析来研究S波分裂,这种方法费用低,但是抗干扰能力差<sup>[21]</sup>。

### 3.4 地震属性分析法

近年来,国内许多学者探讨了地震属性(如振幅、频率、相干、方差、神经网络模式识别、地震吸收、分频等)储层预测技术,在储层预测中取得较好的效果。此外,地震几何属性揭示了地震属性的空间变化规律,包括相似性属性(如相干)和地层倾角、曲率等。

三维相干数据体是通过通过对一定时窗内地震波形纵向和横向相似性的判别得到的三维地震相干性的估计值。具有一定规则的相干数据体低相干值的空间展布特征能直观展示断层,特别是常规构造解释容易被忽略或难以发现的小断层在平面上的发育情况。

地震曲率处理是利用倾角扫描分析曲率属性。在曲率分析过程中凸面获得最大曲率,而凹面获得最小曲率,将二者相乘得到高斯曲率,高斯曲率值大处能产生大量的构造缝。在倾角扫描过程中还能计算倾角变化,倾角变化也对裂缝有

比较好的指示,倾角变化大的地方裂缝发育。

此外小波尺度积、广义希尔伯特变换(Generalized Hilbert Transform, GHT)和基于图像边缘检测等也可有效地进行裂缝预测。陈辉等<sup>[22]</sup>提出数学形态学,它是一种非线性图像处理和分析理论,在边缘检测方面比其他边缘检测算子优势更大。

## 4 测井裂缝识别

测井裂缝识别是基于裂缝性储层所表现出的地质和地球物理异常进行裂缝识别的一种方法<sup>[23]</sup>。目前裂缝检测的测井方法包括常规测井方法及特殊测井资料识别方法。常规测井裂缝识别方法主要包括电阻率测井、声波测井、补偿中子测井、密度测井、补偿密度测井、岩性测井、电磁波测井以及地层倾角测井裂缝识别等,它们可以对一定规模的裂缝进行定性识别。特殊测井技术识别裂缝的方法主要包括全井眼微电阻率扫描成像测井、地层微电阻率扫描成像测井、井下声波电视、纵横波裂缝声波识别测井、微电导率异常识别测井、偶极横波成像测井、方位电阻率成像测井、倾角测井资料裂缝识别等。

成像测井通过图像上的颜色、形态直接反映裂缝,对原始测井资料进行处理,突出了因裂缝变化而引起的岩石声阻抗和电阻率的变化特征,降低了由钻井工程等因素造成的非裂缝响应影响,是目前极为有效的识别裂缝的测井方法,在川西地区致密碎屑岩裂缝识别和评价方面应用效果较好<sup>[24]</sup>。成像测井具有高精度、高分辨率的优点,但成本较高,不可能对全井段进行成像测井,应充分利用岩心、成像测井资料对常规测井资料进行标定,通过常规测井资料对全井段裂缝进行准确识别。

## 5 生产动态分析方法

生产动态资料包括井壁崩落、泥浆漏失、气测录井、钻时钻井、固井质量、油井动态、压裂施工、注水井动态、试井等。陈清贵等<sup>[25]</sup>开展了致密砂岩储层裂缝综合录井识别的研究。对垂直裂缝井试井分析的研究也有大量成果,模型主要包括:Cinco等提出的双线性流模型和二维平面模型、Lee等提出的三线性流模型、邓英尔等<sup>[26]</sup>提出的椭圆流模型。双线性流模型和三线性流模型虽然形式简明、计算速度快,但只能反映压力动态的早期段,而不能得到中晚期的拟径向流;二维平面模型和椭圆流模型虽然曲线完整,但计算速度慢,不能满足实际计算和快速响应的试井解释要求;因此油气藏开发和现场应用迫切需要新的方法,即自动拟合方法替代传统的特征直线法和典型曲线拟合法。目前对试井解释自动拟合方法的研究已有一些成果,但还面临很多问题和困难,亟待深入研究和发

## 6 发展方向

裂缝的空间分布规律和参数的定量表征研究是石油地质学的前沿性课题。随着研究内容的不断深入和研究方法的

不断丰富,对储层构造裂缝的认识将不断完善,新技术和新方法将不断出现,储层构造裂缝预测研究中的难点问题将不断获得突破,工程实践中的储层裂缝预测将找到越来越有效的解决途径。今后裂缝预测的主要任务之一是继续进行方法创新,广纳其他领域基础理论与技术研究成果展开二次探索开发。

储层构造裂缝的分布规律受多种因素的影响,不同的地质背景和同一地质背景不同阶段产生的裂缝具有不同的参数和空间分布。采用单一的研究方法很难取得满意的效果,储层构造裂缝预测方法的另一个发展趋势是系统集成方向,充分利用不同方法的优点,有针对性地进行不同单一方法的组合,综合成一个相互补充,相互迭代优化的系统工程。

### 参考文献 (References)

- [1] 王时林, 秦启荣, 苏培东. 储层裂缝识别与预测[J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 31-33.  
Wang Shilin, Qin Qirong, Su Peidong. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2009, 16(5): 31-33.
- [2] 宋永东, 戴俊生. 储层构造裂缝预测研究[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(6): 9-13.  
Song Yongdong, Dai Junsheng. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2007, 14(6): 9-13.
- [3] Price N J. Fault and joint development in brittle and semibrittle rock[M]. London: Pergamum Press, 1966.
- [4] Murray G H. Quantitative fracture study: sanish pool, Mckenzie County, North Dakota[J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(1): 57-65.
- [5] Narr W, Lerch I. A method for estimating fracture density in core[J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(5): 637-648.
- [6] 李同德, 文世鹏. 储层构造裂缝的定量描述和预测方法 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1996, 20(4): 6-10.  
Li Tongde, Wen Shipeng. *Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition*, 1996, 20(4): 6-10.
- [7] 宋惠珍, 曾海容, 孙君秀, 等. 储层构造裂缝预测方法及其应用 [J]. 地震地质, 1999, 21(3): 205-213.  
Song Huizhen, Zeng Hairong, Sun Junxiu, et al. *Seismology and Geology*, 1999, 21(3): 205-213.
- [8] 周新桂, 操成杰, 袁嘉音. 储层构造裂缝定量预测与油气渗流规律研究现状和进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 398-404.  
Zhou Xingui, Cao Chengjie, Yuan Jiayin. *Advance in Earthsciences*, 2003, 18(3): 398-404.
- [9] 丁中一, 钱祥麟, 霍红, 等. 构造裂缝定量预测的一种新方法——二元法[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 1-7.  
Ding Zhongyi, Qian Xianglin, Huo Hong, et al. *Oil & Gas Geology*, 1998, 19(1): 1-7.
- [10] 谭成轩, 王连捷. 三维构造应力场数值模拟在含油气盆地构造裂缝分析中应用初探[J]. 地球学报, 1999, 20(4): 392-394.  
Tan Chengxuan, Wang Lianji. *Acta Geoscientica Sinica*, 1999, 20(4): 392-394.
- [11] 巫芙蓉, 李亚林, 王玉雪, 等. 储层裂缝发育带的地震综合预测[J]. 天然气工业, 2006, 26(11): 49-51.  
Wu Furong, Li Yalin, Wang Yuxue, et al. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(11): 49-51.
- [12] 张明, 姚逢昌, 韩大匡, 等. 多分量地震裂缝预测技术进展[J]. 天然气地球科学, 2007, 18 (2): 293-297.  
Zhang Ming, Yao Fengchang, Han Dakuang, et al. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(2): 293-297.
- [13] 黄中玉, 赵金洲. 正交基旋转的横波分裂检测技术[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(2): 150-152.  
Huang Zhongyu, Zhao Jinzhou. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39 (2): 150-152.
- [14] 黎书琴, 李忠, 张白林. 利用横波分裂预测裂缝 [J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(1): 130-134.  
Li Shuqin, Li Zhong, Zhang Bailin. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(1): 130-134.
- [15] Mallick S, Craft K L, Meister L J, et al. Determination of the principal directions of azimuthal anisotropy from P-wave seismic data[J]. *Geophysics*, 1998, 63(2): 692-706.
- [16] 曲寿利, 季玉新, 王鑫, 等. 全方位 P 波属性裂缝检测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 391-397.  
Qu Shouli, Ji Yuxin, Wang Xin, et al. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001, 36(4): 391-397.
- [17] 杨克明, 张虹. 地震三维三分量技术在致密砂岩裂缝预测中的应用——以川西新场气田为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(5): 683-689.  
Yang Keming, Zhang Hong. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(5): 683-689.
- [18] Gray D, Head K V. Fracture detection in the Manderson Field: A 3D AVAZ case history[J]. *Leading Edge*, 2000, 19(11): 1214-1221.
- [19] Schoenberg M, Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks [J]. *Geophysics Prospecting*, 1988, 36: 571-590.
- [20] Gaiser J E. 3D converted shear wave rotation with layer stripping: US, 5610875[P]. 1997-03-11.
- [21] 蒲静, 秦启荣. 油气储层裂缝预测方法综述[J]. 特种油气藏, 2008, 15 (3): 9-13.  
Pu Jing, Qin Qirong. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2008, 15(3): 9-13.
- [22] 陈辉, 胡英, 李军. 数学形态学在地震裂缝检测中的应用 [J]. 天然气工业, 2008, 28(3): 48-50.  
Chen Hui, Hu Ying, Li Jun. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(3): 48-50.
- [23] 高霞, 谢庆宾. 储层裂缝识别与评价方法新进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1460-1465.  
Gao Xia, Xie Qingbin. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(5): 1460-1465.
- [24] 葛祥, 张筠, 吴见萌. 川西须家河组致密碎屑岩裂缝与储层评价[J]. 测井技术, 2007, 31(3): 211-215.  
Ge Xiang, Zhang Yun, Wu Jianmeng. *Well Logging Technology*, 2007, 31(3): 211-215.
- [25] 陈清贵, 潘小东. 致密砂岩储集层裂缝综合录井识别技术研究[J]. 录井工程, 2006, 17(3): 6-9.  
Chen Qinggui, Pan Xiaodong. *Mud Logging Engineering*, 2006, 17(3): 6-9.
- [26] 邓英尔, 刘慈群. 垂直裂缝井开发低渗油藏非线性渗流压力分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 81-83.  
Deng Yinger, Liu Ciqun. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(1): 81-83.

(责任编辑 刘志远)