

油气勘探专题资料之十三

裂缝性储集层测井解释技术

石油工业部科学技术情报研究所

一九八七年三月

油气勘探专题资料之十三

30164

裂缝性储集层测井解释技术

钟兴水 著



0-2711116



200419305

石油工业部科学技术情报研究所

正文设计：杜建林

责任校对：段利君

裂缝性储集层测井解释技术

开本 787×1092 毫米 1/16 · 2.125印张 编辑：《油气勘探译丛》编辑部

字数：2万 印数：1—1500

出版：石油工业部科学技术情报研究所

1987年3月北京第一次印刷

印刷：北京顺义燕华营印刷厂

油情(单) 37016 工本费：~~0.40~~元

发行：石油工业部科学技术情报研究所

0.50

(北京和平里七区十六号楼)

前 言

随着世界油气田勘探和开发的不断深入，裂缝性油气田的油气产量所占的地位也越来越重要。据1975年统计资料，全世界裂缝性油气田的可采储量达400亿桶以上。因此，研究裂缝性储集层的地质特性及其测井方法与解释技术，已是测井工作者面临的一个重要课题。近年来，国内外在研究裂缝性储集层测井方法与解释技术方面，有了不少进展，发展了一些新方法、新仪器和新的解释技术。

本文根据国外几个大的裂缝性油气田（如伊朗的 Asmari 油田，法国的 Parentis 油田和 Lacy 气田，美国的 Sprawberry 油田等）以及我国的四川、任丘等油气田的有关资料，就裂缝性储集层的测井方法与解释技术，作一综述。

本专辑由石油部科技司委托《油气勘探译丛》编辑部组织编辑出版。

目 录

概述	(1)
裂缝性储集层的地质特性	(2)
一、岩性	(2)
二、孔隙与裂缝的几何形状和空间分布	(2)
三、裂缝性储集层的分类	(2)
四、裂缝性储集层含油气特性	(3)
五、裂缝性储集层的生产特性	(3)
裂缝性储集层的识别和划分	(4)
一、测井方法的选择	(4)
二、裂缝性储集层的测井响应及识别方法	(5)
1. 电阻率测井	(5)
2. 声波测井	(13)
3. 放射性测井	(17)
4. 其他测井	(20)
裂缝性储集层参数的解释方法	(20)
一、裂缝参数的评价方法	(21)
1. 裂缝组系和产状	(21)
2. 裂缝宽度	(21)
3. 裂缝密度和间距	(21)
二、储集层参数的评价方法	(21)
1. 总(有效)孔隙度	(21)
2. 垂直裂缝储集层的次生孔隙度指数	(21)
3. 裂缝孔隙度	(22)
4. 溶洞孔隙度	(22)
5. 含水饱和度	(22)
6. 渗透率	(24)
裂缝性地层测井刻度及模型	(26)
一、刻度试验坑的结构和物性参数	(26)
二、测量试验结果	(27)
结束语	(28)

裂缝性储集层测井解释技术

钟兴水

(江汉石油学院)

概 述

裂缝性储集层的研究大约始于四十年代的后期;用测井方法评价裂缝性储集层的探索,则大体上始于五十年代初期。早期评价裂缝性储集层的测井方法主要是一些常规的方法,如声波时差,声波—中子—密度的交会,长短电位电极,深浅侧向,深浅感应—八侧向,井温以及自然电位等。当时仅限于划分裂缝段和定性判断裂缝。七十年代后期以来,用测井评价裂缝性储集层的研究,取得了较大的进展。这个时期的特点是:逐步形成了一套较有效的探测裂缝系统的测井系列;不少地区总结出了一套适合本地区特点的行之有效的识别和综合评价裂缝的解释技术或经验。这个时期新发展起来并适用于研究裂缝的测井方法与仪器主要有:

1. 声波测井方面:长源距声波,横波,声幅,全波波形,低频斯通利波(管波),环形声波,井内声波电视,声路偏移等;

2. 电阻率测井方面:裂缝识别测井,地层学高分辨率地层倾角测井,微电阻率扫描测井,电磁波传播测井等;

3. 放射性测井方面:自然伽马能谱测井,岩性密度测井,热中子衰减时间测井,放射性示踪法等。

七十年代后期以来,还进行了一些实验研究工作,主要有:用声路偏移法和环形声波测井划分垂直裂缝的实验;纵波传播速度与石灰岩、白云岩的总孔隙度及基块孔隙度关系的实验;影响裂缝岩层电阻率因素的实验等。最近,在美国科罗拉多州丹佛市联邦中心建造了一个校验测井仪器刻度的试验坑。它提供了一种低孔隙高密度的裂缝岩石的校验模型,为测井创造了在裂缝性硬地层的环境下测准资料的基础和条件,有利于提高对裂缝性储集层的评价。

在识别裂缝和综合评价裂缝性储集层的解释技术方面,R. Aguilera提出了FCL程序⁽¹⁾; E. A. Koerich、W. B. Beydoun等探索了用管波资料估计裂缝渗透率的方法⁽⁸⁾; M. Peeters提出了用热中子衰减时间测井、高分辨率井温测井及纵、横波速度比值(V_p/V_s)来确定人工裂缝角度⁽¹³⁾。

总的说来,近年来用测井方法划分和分析裂缝的研究工作有较大的进展,并取得了较好的地质效果。在定性识别裂缝带、判断裂缝角度与发育趋向方面,也取得了不少地区性经验。但目前仍没有一套普遍适用的定量估算裂缝参数的测井分析方法。

裂缝性储集层的地质特性

一、岩 性

裂缝性储集层的岩性成分比较复杂，包括白云岩、石灰岩、泥岩、燧石、页岩、粉砂岩、砂岩、火成岩及变质岩等。

与普通的储集层（粒间孔隙结构的储集层）相比，裂缝性储集层在岩性特征上还具有岩性胶结致密坚硬、基块孔隙极小等特征。换句话说，裂缝性储集层多出现在硬地层中。

在我国的华北、四川和辽河等油田，一些裂缝性储集层的岩性成分主要是白云岩、石灰岩、变质岩和火成岩（如花岗岩等），这些地层多属于硬性的地层。

二、孔隙与裂缝的几何形状和空间分布

裂缝性储集层的孔隙类型、结构及分布十分复杂。有沉积时形成的原生孔隙；有成岩和后生的次生孔隙。原生孔隙包括粒间孔隙、晶间孔隙、层理面之间的孔隙，原生沉积（生物沉积）过程被水充填的小溶洞以及喷发岩的气孔等。次生孔隙包括：由于岩体收缩产生的裂缝和空洞；与重结晶作用有关的裂缝；由地壳中应力造成的裂缝；由岩石表面风化造成的裂缝和空洞；由地下水溶解作用产生的洞穴等。

通常基块原生孔隙极小，孔隙度一般小于3%。

由于形成裂缝及溶洞的原因多种多样，在地层中裂缝及溶洞的几何形状也是多种多样的，甚至在同一地层中它们的宽度、长度及产状等可能各不相同。在一般情况下，裂缝在地层中的分布是不均匀的。图1示出了裂缝在地层中的各种分布（实际地层中裂缝分布情况比图1所示的情况要复杂得多）。

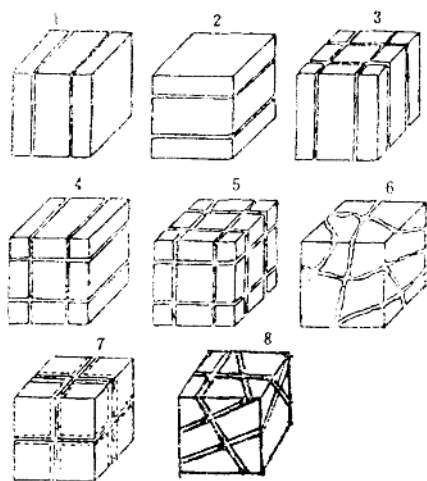


图1 裂缝的各种分布

三、裂缝性储集层的分类

下面以碳酸盐岩裂缝性储集层为例。由于成岩作用和后生的改造作用而形成的储集空间实际上是由三种类型的空隙即裂缝、溶洞和基质空隙所组成。这种裂缝性储集层实际是在晶粒间的基质孔隙的背景上发育着次生的裂缝和溶洞。从而形成了上述三种基本的孔隙结构类型。由于裂缝本身的不规则性和不连续性。再加上地下水沿裂缝网络的次生溶解作用，使碳酸盐岩储集层至少出现三种不同类型：裂缝（包括溶蚀的缝洞）型，复合（裂缝、溶洞和孔

隙)型和似孔隙型。

根据R.Aguilera⁽¹⁵⁾和Louis, H.Reiss⁽¹⁶⁾等人的研究结果, 裂缝性储集层按裂缝与孔隙的匹配情况分为三种类型(见图2)。

A类: 孔隙空间大于裂缝空间10倍(相当于苏联E.M.斯苗霍夫⁽²⁰⁾提出的裂缝孔隙型储集层);

B类: 裂缝与孔隙储集能力接近, 裂缝为主要渗滤通道(相当于苏联E.M.斯苗霍夫⁽²⁰⁾提出的孔隙裂缝型储集层)。

C类: 基质孔隙度极低, 裂缝为主要储集空间及渗滤通道(相当于苏联E.M.斯苗霍夫提出的裂缝型储集层)。

苏联学者A.C.彼斯特里科夫, 建议按地球物理资料把裂缝性储集层分成三类⁽²⁰⁾:

- 裂缝型: 包括微裂缝和大裂缝;
- 溶洞型: 包括微溶洞和大型溶洞;
- 混合型: 孔隙与裂缝相混合。

生产中, 描述裂缝的主要参数包括: 裂缝孔隙度, 裂缝宽度与长度, 裂缝密度, 裂缝面倾角和方向, 裂缝间距等。图3示意了可见的岩心描述裂缝参数的情况。

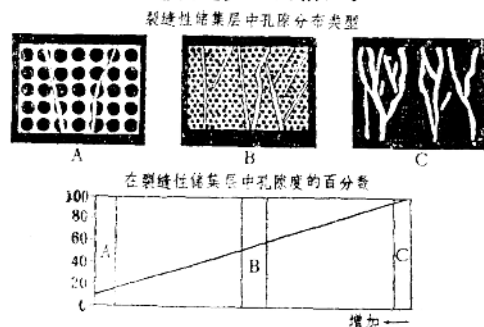


图2 裂缝性储集层的储、渗类型

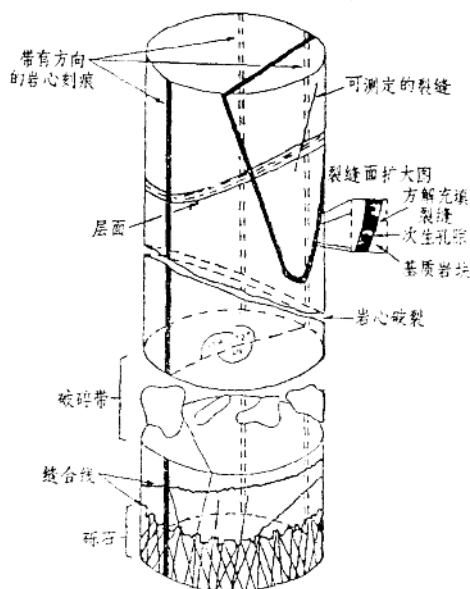


图3 可见的岩心描述裂缝参数图

四、裂缝性储集层含油气特性

在裂缝性储集层中, 含油气的储集空间是裂缝、溶洞以及与它们相接触的微孔隙(晶间、粒间等基底孔隙)。这些储集空间的含油气特性, 一般与裂缝的宽度有关。我国华北任丘油田裂缝性碳酸盐岩储集层, 其含油特性与裂缝发育程度及宽度有密切关系⁽¹⁹⁾。一般情况是: 在油水界面以上, 不同的裂缝宽度含油性不同, 其孔隙度、渗透率和含油性都较好。钻开含油部位后, 裂缝中的油气多被泥浆冲洗干净, 测井时地层(在探测半径内的地层)的含油饱和度较低, 岩心烘烤后不见原油外溢, 但这种地层往往是油田开发的主要目的层。

五、裂缝性储集层的生产特性

裂缝性储集层的生产特性取决于裂缝渗透率的大小。根据F.D.Van对各种裂缝参数的统

计, 裂缝渗透率与裂缝孔隙度之间大体有如下关系⁽¹⁴⁾: 裂缝孔隙度为0.001~3%, 渗透率为3~1300毫达西。

裂缝性储集层的生产特性大体有两种类型: 第一类, 基质孔隙度为百分之几, 基质渗透率为1毫达西左右, 裂缝孔隙度为1%左右, 裂缝渗透率为1~100毫达西的储集层, 采收率为18~54%; 第二类, 基质孔隙度极低, 次生孔隙度(溶孔及裂缝)为0.01~1%, 总渗透率 $\gg$ 1毫达西的储集层, 其采收率为15~80%, 注水驱替时效率更高, 流体主要沿裂缝发育部位流动。

综上所述, 裂缝性储集层的岩石物理特性(无论是岩性和储集空间的特性)都比孔隙性储集层复杂得多。这种储集层突出的物理特性和由此而形成的测井条件主要是:

1. 被研究的层基质是坚硬致密的岩石, 且其孔隙度是极低的, 因此测井所面临的测量条件是一种电阻率极高的高阻剖面, 作电阻测量时, 必须克服井内严重的分流影响问题。

2. 被研究的储集层的主要储集空间, 绝大多数是由那些结构和分布极不均匀的裂缝(或溶洞)组成的, 因此测井所面临的另一个测量条件是非均匀性和各向异性, 要求所选择的测井方法应能反应裂缝引起储集层的非均质及各向异性。

3. 由于裂缝的渗透性较好, 在钻井过程中, 在裂缝发育的部位都会造成泥浆(或泥浆滤液)的严重侵入, 而在非裂缝部位泥浆侵入则很浅或不侵入, 因此测井所面临的第三个条件是侵入深浅悬殊的地层, 这就要求所选择的测井方法应具有更大的探测深度和有一套由深浅探测能力相匹配的测井组合。

4. 被井钻遇的裂缝或裂缝发育带厚薄不一, 有时可能是只有几条较大的裂缝形成的极薄的裂缝层, 因此测井所面临的第四个条件是探测的目的层可能是厚度极薄的储集层, 这就要求所选择的测井系列应具有更高的纵向分辨率。

裂缝性储集层的识别和划分

一、测井方法的选择

与孔隙性储集层相比, 裂缝性储集层对测井曲线的响应增加了裂缝诸因素的影响, 这些影响使测井解释的多解性更加明显了。这一点在裂缝性地层解释工作中要特别注意。

根据国外的经验, 研究孔隙结构复杂的裂缝性储集层, 应从岩性、物性、含油性以及孔隙结构之间的相互关系入手, 并结合试油、试采资料, 经过多方面的对比分析、不断摸索, 才能总结出一套行之有效的评价方法。

评价裂缝性储集层的首要任务是探测和分析裂缝(即识别和划分裂缝)。为了有利于探测和分析裂缝, 要求有一套较完善的相匹配的测井方法。通常是根据裂缝性地层的地质物理特性来选配测井方法(系列)。考虑到前述的裂缝性储集层的地质物理特性, 选配裂缝性地层测井系列的原则主要是:

1. 由于裂缝总与致密易脆的硬岩石(常见的是低孔或极低孔的岩石)相伴, 所选的测井方法对致密低孔的特性应具有较好的响应能力;

2. 所选择的测井方法应能反映裂缝引起的储集层的非均匀性及各向异性;

3. 所选择的测井方法应具有较大的探测深度, 以及由浅到深的相匹配的一套探测系统;

4. 所选择的测井方法应具有较高的纵向分辨率。

根据一些国家的经验, 满足上述要求或部分满足上述要求的测井方法大体有下列几种
在电阻率测井方面:

- 双倾向测井;
- 微球形聚焦测井;
- 地层倾角测量中的裂缝识别测井;
- 地层倾角测量中的电导率异常检测;
- 地层倾角测量中的定向微电阻率测井;
- 微电阻率扫描测井; 等等。

在声波测井方面:

- 声波时差测井;
- 长源距声波测井;
- 环形声波测井;
- 管波测井
- 声路偏移测井;
- 噪声测井; 等等。

在放射性测井方面:

- 密度测井;
- 岩性密度测井;
- 补偿中子测井;
- 自然伽马和自然伽马能谱测井; 等等。

在其它测井方法方面:

- 井温测井;
- 井眼重力测量;
- 重复式地层测试器测量; 等等。

二、裂缝性储集层的测井响应及识别方法

孔隙与裂缝共存于一地层内, 这是裂缝性地层区别于孔隙性地层的显著标志之一。在岩性不变的情况下, 孔隙与裂缝的不同组合, 可以引起不同的测井响应, 根据这些响应的变化, 人们便可以识别和分析裂缝。这就是划分裂缝的基本依据。下面分别叙述非均匀裂缝孔隙地层的测井响应。

1. 电阻率测井

地层电阻率是指示裂缝性储集层的重要信息。裂缝总是与致密低孔的硬地层相伴, 而硬地层总以高电阻率 (1000~5000欧姆米以上) 显示, 裂缝中又总是充填一些导电物质, 电阻率相对较低。因此, 裂缝性储集层通常是以极高的电阻率作为背景, 以电阻率的降低显示出来, 我们可以借此来指示裂缝的存在和发育程度。这是用电阻率法识别和分析裂缝的总体规律。由于基质不同、孔隙与裂缝产状不同以及孔隙与裂缝中充填流体性质的不同, 高电阻率的背景值和电阻率降低的程度也不同。

(1) 双侧向电阻率测井响应

双侧向电阻率测井是指示裂缝性地层的最理想的一种聚焦电阻率测井。双侧向以厚约0.6米的聚焦电流来探测地层电阻率,因此它的纵向分辨率为0.6米。它具有使井眼、泥浆和层厚影响降到很小的优点,这对于在高电阻致密的硬地层中寻找裂缝是极为必要的。深双侧向的探测深度约为2米,浅双侧向的探测深度约为0.8米,深、浅双侧向的探测空间体积分别为 7.54 m^3 和 1.2064 m^3 。

在低阻泥浆条件下,在相对于围岩为低阻的裂缝性储集层部位,深双侧向探测深度明显增大,而浅双侧向探测深度则可能减小。选择合适的电极系尺寸,就有可能得到两个纵向特性相同、而径向测深相差较大,使所测量的电阻率值相差较大的结果,从而有利于识别和研以裂缝。通常,深双侧向电阻率反映原状地层,浅双侧向电阻率反映侵入带。比较两者还可究区分裂缝内含油气水性质。

根据模型实验研究,发现裂缝对双侧向电阻率的响应不仅与裂缝孔隙度大小、孔隙及裂缝中充填的流体电阻率有密切关系,而且与裂缝的产状(倾角与方位)有关。一般的情况是:对于相对于井轴倾角为 $60\sim 70$ 度以下的水平裂缝和低角度的斜交裂缝,深、浅双侧向曲线重合(读数相等)或呈负幅度差^①($R_{LLS} > R_{LLD}$);对于倾角(相对于井轴)为 $75\sim 83$ 度以上的高角度斜交裂缝,深、浅双侧向曲线呈正幅度差($R_{LLD} > R_{LLS}$)。图4是模型试验的结果。由图可见,双侧向电阻率在裂缝角度为 45 度时呈最大的负差异, 90 度时呈最大的正差异。

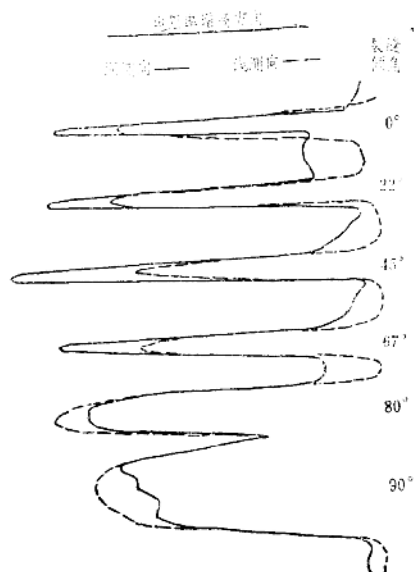


图4 含水裂缝与井轴呈不同角度时双侧向测井读数的反应

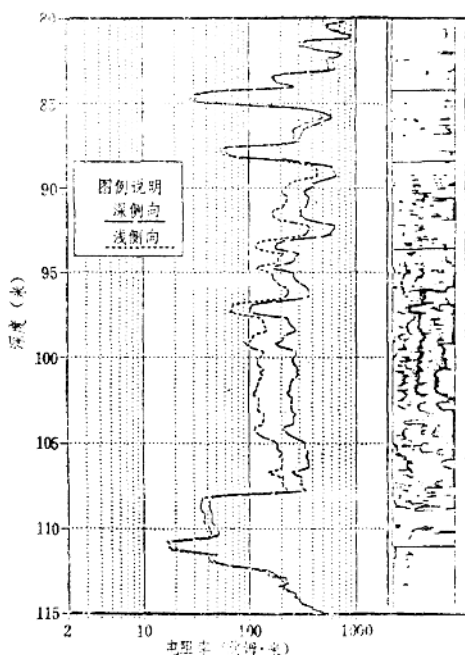


图5 密集发育的亚垂直裂缝测井图

在探测范围内垂直裂缝对浅双侧向的有效导电截面比深双侧向要大,因此,当 $R_{mf} > R_w$ 时,在双侧向测井曲线上,垂直裂缝一般呈正差异($R_{LLD} > R_{LLS}$)。

① 幅度差指数值降低的差异

图5是一幅具有发育的垂直裂缝井的测井图。图中双侧向测井曲线表现出明显的正差异。

图6是一幅标准的水平裂缝测井曲线显示。由图可见,在水平裂缝部位,双侧向测井曲线基本上完全重合。

(2)微球形聚焦测井

微球形聚焦测井是极板推靠式测井,其探测空间呈半球形(半球形体积约为 0.0011m^3),探测深度很浅,约10厘米。在一般情况下,它测得的电阻率可认为是冲洗带电阻率。

在裂缝性储集层部位上,微球形聚焦测井曲线呈低尖显示。当仪器极板贴靠在由裂缝发育所形成的椭圆井眼长轴方向时,由于裂缝导电空间占其探测的微小空间的比例增加,微球形聚焦测井测得的电阻率(R_{MSFL})要比双侧向电阻率小得多(常出现低1~2个数量级),或出现 $R_{\text{LLD}} > R_{\text{LLS}} \gg R_{\text{MSFL}}$ 的现象,如图6所示。

根据微球形聚焦测井曲线的低尖表现形式及其纵向扩张范围和测量的重复性,可以分析裂缝是水平的还是垂直的。

一般认为,微球形聚焦测井的电流场分布呈半球状,即它的探测空间呈扇形状,探测深度很浅,约10厘米左右。双侧向测井主电流场分布呈一种垂直于电流表面,厚度约为主电极长度的电流层(或电流盘),它水平地流入地层。因此,双侧向的纵向探测厚度约0.6米,深、浅双侧向的探测深度分别为2.0米和0.8米。微球形聚焦及深、浅双侧向的探测空间体积分别约为 0.11m^3 、 7.54m^3 和 1.2064m^3 。

水平裂缝特别发育时,由于水平裂缝可近似看成导电薄层,双侧向探测电流的聚焦作用得到加强。当 R_{mf} 与 R_{w} 接近时,常出现 $R_{\text{LLD}} \approx R_{\text{LLS}}$,当上下邻层电阻率很高且 $R_{\text{mf}} > R_{\text{w}}$ 时,由于屏蔽作用使电场畸变,浅双侧向电阻率 R_{LLS} 升高,甚至在含油气井段可出现 $R_{\text{LLS}} > R_{\text{LLD}}$ 。

垂直裂缝时,由于垂直裂缝的有效导电截面在径向上始终不变,而微孔隙的有效导电截面在径向上随延伸方向而增大,浅双侧向探测空间内的裂缝部分与微孔隙部分的有效导电截面之比远较深双侧向大,故出现 $R_{\text{LLD}} > R_{\text{LLS}}$;有时高角度含水裂缝层且 $R_{\text{mf}} > R_{\text{w}}$ 时,则出现 $R_{\text{LLS}} > R_{\text{LLD}}$ 。微球形聚焦仪器的极板有时贴靠于裂缝发育所造成的椭圆井眼的长轴方向上,裂缝的导电空间占其探测的微小空间的份量增加,因此微球形聚焦电阻率 R_{MSFL} 比双侧向读数小得多,出现 $R_{\text{LLD}} > R_{\text{LLS}} \gg R_{\text{MSFL}}$ 现象,这说明地层有发育的垂直裂缝。

(3)地层倾角—裂缝识别测井

高分辨率地层倾角测井资料是指示裂缝的有效信息。高分辨率地层倾角测井仪器的四个极板测量的电导率相关曲线,具有厘米级的高纵向分辨率(这特性适合于层面和裂缝的探测)和很浅的探测深度。

由于地层的电导率对裂缝产状有较强的响应,利用高分辨率地层倾角测井仪器的聚焦微电导率显示,有可能指示裂缝的位置、厚度和产状等。这种测井方法通常称为裂缝识别测井(FIL)。目前,根据地层倾角测井得到的四条微电导率曲线,可以处理出三种显示裂缝的成果图(DCA)和定向微电阻率测井图(OMRL)。

①裂缝识别测井响应

裂缝识别测井记录四条贴靠井壁互成90度角极板的微聚焦电导率曲线。当极板沿井壁运动遇到裂缝时,就产生高电导率异常,对四条对比曲线(即电导率曲线)进行不同形式的处理,可以达到识别裂缝的目的。一般采用相邻极板曲线依次进行重叠处理(即1—2, 2—3, 3—4, 4—1号极板电导率曲线重叠)。当仪器位于水平裂缝部位时,四个极板在相同深度上

测出相近的电导率值，重叠曲线上显示出高电导率异常井段，但重叠曲线的幅度差较小。当仪器位于高角度或斜交裂缝部位时，常有一个或两个极板遇到裂缝，它们相应测出高电导率，并在纵向上有一定的扩展（即有一定的厚度），重叠曲线的幅度差较明显，出现的深度也不一致，如图7所示。在高角度裂缝部位，1号极板方位角常常不显示出变化，这表明仪器是在由裂缝造成的井壁槽沟（键槽）内移动，根据这一现象，可解释高角度裂缝存在。图7所示的井段，在钻井钻达3238米时发生了严重井漏，表示裂缝发育。图中的显示与钻井显示能相对应。从测井图上可以读得1号极板方位（为210度）和各条曲线异常的深度（依次为3238.76米、

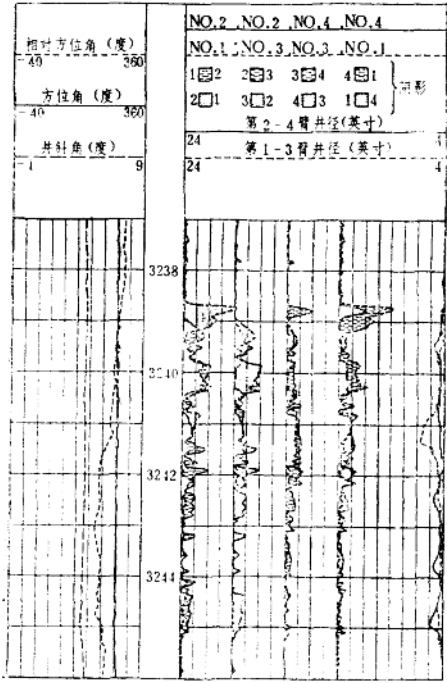


图7 裂缝识别测井图

（根据华北石油管理局勘探开发研究院资料）

3239.3米、3239.36米和3238.81米），据此可以通过计算机计算出裂缝的方位和角度（方向为北东东，倾向为南南东，倾角为80°）。图7中3238.5米处为高角度裂缝显示，其延续的厚度为6.5米。

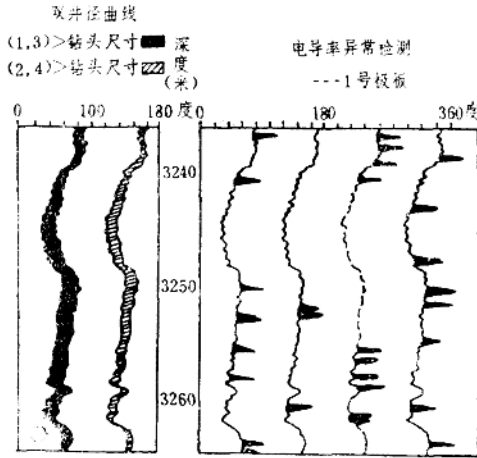


图8 DCA处理成果图

②电导率异常检测

电导率异常检测（DCA）是专门用来显示高角度裂缝的一种方法，其资料直接来自地层倾角测井的原始记录。电导率异常检测图的构制过程是：先将相邻的极板的电导率曲线相减，求得其差值，并找出大于某一门限值的差值；当在一定对比长度内大于某一门限值的差值点数（厚度）达到一定数值时，就显示出一个异常，这就是所谓的“电导率异常”。利用这个异常可以检测高角度裂缝。门限值可通过地区试验或与岩心资料相比较来确定。

这种方法排除了地层层面所引起的假异常，同时不显示水平裂缝，在检测图上还可以直接读出裂缝的方法。图8所示的曲线是一个井段的DCA处理成果图。图中曲线异常位置表示了各极板遇到高角度裂缝的深度和方法，3250~3260米是裂缝发育的井段，在该井段内各极板均遇到高角度裂缝。当方位为60°和240°时，裂缝最为发育。在这井段上，其它曲线也显示出裂缝相当发育。

③裂缝方法频率图

根据电导率异常的方位和仪器的方位两张频率图，可以计算出加权的电导率异常方位频率玫瑰图。此图表示出一定井段不同方位的裂缝发育的丰度，从而可以确定出主要裂缝和次要裂缝的方向，这对于研究构造裂缝、裂缝的控制作用以及布置新井位都有较大的参考意义。图9所示为某一井段内裂缝方位的频率图。它说明该井段内裂缝方向以 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 和 $320^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 两组居多。

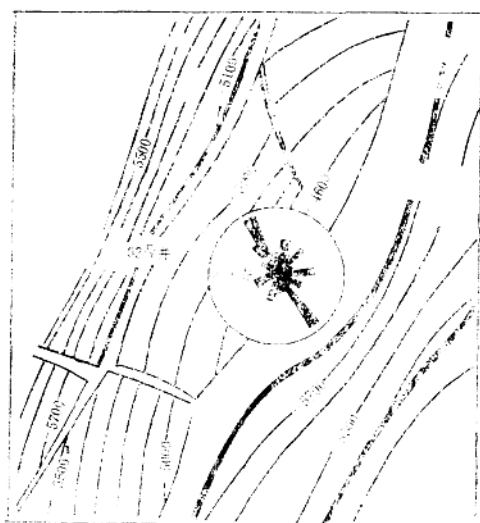


图9 裂缝方位频率图与结构断裂方向关系图

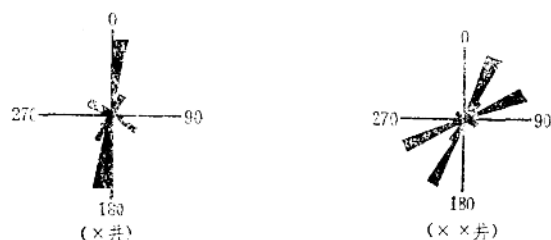


图10 椭圆井眼长轴方向频率图

的起算值和计算的步长。用井眼长轴方向的频率图，可以分析裂缝的延伸方向及主要裂缝和次要裂缝发育的方向。

以上几种裂缝识别测井方法，各有其特点。据我国一些地区与岩心裂缝的对比，它们显示裂缝的符合率比其他电阻率测井方法和孔隙度测井方法的符合率都高（约高10~15%），其中以电导率异常检测最为明显。

(4)微电阻率扫描测井

1981年，斯仑贝谢公司道尔研究中心研制了一种微电阻率扫描测井仪^[18]，其主要目的是研究微小的岩层结构和沉积环境的变化，后又转向研究微裂缝的划分。初步试验表明，此法对裂缝有较高的分辨率并可判断闭合缝或张开缝。

微电阻率扫描测井仪只用一块贴井壁的金属板。板上嵌有40个相互绝缘的电极，电极直径为6毫米，电极之间的横向距离为2.5毫米，每排电极之间的距离为10毫米，电极总尺寸为 135×150 毫米²（见图11）。采用很低的频率的电流源，从极板上的小电极依次向地层发出电流。当保持电压恒定时，测量流经地层的电流变化，以反映地层电导率的变化。当地层电阻率高时，流经地层的电流变小，相应地在荧光屏上显示出浅色（如石灰岩）；当地层电阻率

④双井径曲线重叠

利用地层倾角测井仪器测量的两组方向互为垂直的微井径曲线，可以定性地判断地层裂缝发育部位和裂缝的延伸方向。这种测井方法又称为井眼几何形状测井（如图8的左半部分所示）。

如果两条微井径曲线数值相等，则曲线重叠，表明井眼近似呈圆形，无大裂缝通过井壁；如果两条微井径曲线数值不相等，则曲线重叠后出现幅度差，表明井眼近似呈椭圆形，椭圆的长轴方向即井径增大的方向。井径增大被认为是裂缝引起的。因此，长轴方向可认为是裂缝延伸方向。长轴方向可通过I号极板的方位角曲线来计算。

根据井眼几何形状测井资料，同样可以整理出一张井眼长轴方向的频率图，如图10所示。整理时需规定幅度差的起算值和计算的步长。

低时,相应显示出深色(如页岩)。微电阻率扫描仪采用逐个扫描方法,同时测量40条电流变化曲线,由此产生连续的反映地层电阻率变化的深浅不同的岩层图像。硬地层(即基块)是高电阻率,硬地层中的裂隙则是低电阻率。因此,裂隙部位在荧光屏上是以浅色为背景以深色条带或条纹来显示的。

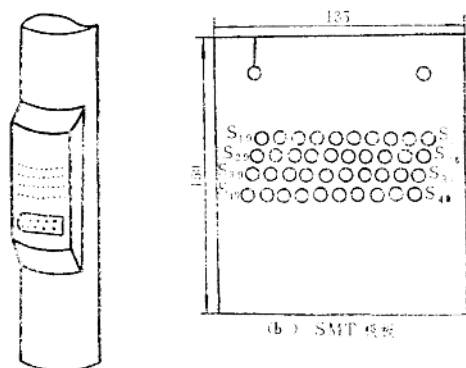


图 11 微电阻率扫描测井仪电极板示意图

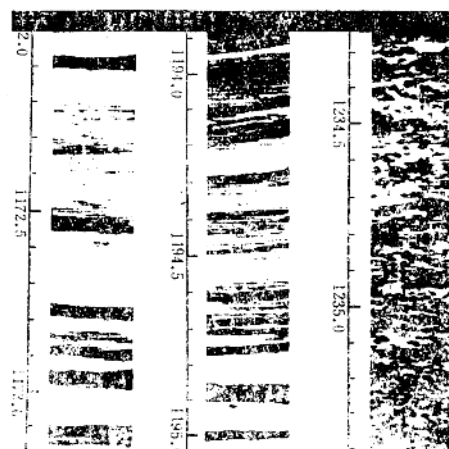


图 12 微电阻率扫描测井图像(试验资料)

由于电极之间水平距离很小(2.5毫米),微电阻率扫描测井仪有很高的纵向分辨率和径向分辨率。高的纵向分辨率可探测毫米级的裂隙及厘米级的薄层。图12所示的图像,是微电阻率扫描测井的试验结果。

(5) 电磁波传播测井

电磁波传播测井(EPT)记录的是电磁波(发射频率为1.1千赫)在地层中的传播时间

表 1

介 质	t_p (毫微秒/米)	ϵ
石 英	7.2	4.65
方 解 石	9.1	7.5
白 云 石	8.7	6.8
菱 铁 矿	8.8 ~ 9.1	6.8 ~ 7.5
褐 铁 矿	10.5 ~ 11.0	9.9 ~ 10.9
正 长 石	7.0 ~ 8.2	4.4 ~ 6.0
绿 泥 石		5.8
白 云 母	8.3 ~ 9.4	6.2 ~ 7.9
黑 云 母	7.3 ~ 8.2	4.8 ~ 6.0
岩 盐	7.9 ~ 8.4	5.6 ~ 6.3
硬 石 膏	8.4	6.3
石 膏	6.8	4.1
钾 盐	7.2 ~ 7.3	4.6 ~ 4.8
纯 水	30	80
盐 水	25	56
油	4.9	22
甲 烷 气	3.3	1.0

(单位为毫微秒/米)及其幅度衰减值(单位为分贝/米)。仪器源距为8厘米,间距为4厘米;探测范围很小,纵向探测厚度约4厘米,径向探测深度为1~3英寸,主要反映冲洗带内的情况。

电磁波传播速度与介质的介电常数有关。表1中列出了几种主要岩石和液体的介电常数 ϵ 与电磁波传播时间 t_0 的数据。水的电磁波传播时间为25~30毫微秒/米,而油、气的电磁波传播时间为4.9~3.3毫微秒/米,二者相差较大,而且前者基本上与矿化度无关。利用此特性,可以区分流体类型,判断冲洗带内含油气水性质。

另外,裂缝发育部位易被泥浆滤液侵入,因此电磁波传播时间常常呈现明显的高值。据此,可以划分与井连通的裂缝发育带(与有关资料配合)。泥浆与水的电磁波传播时间较接近,但它们的幅度衰减程度不同,泥浆的衰减率较高,而水的衰减率较低,据此可以把二者分开。图13所示为一段裂缝性地层的电磁波传播测井图。如图17所示的裂缝性地层的电磁波传播测井曲线,也说明了此法对裂缝指示有明显的效果。

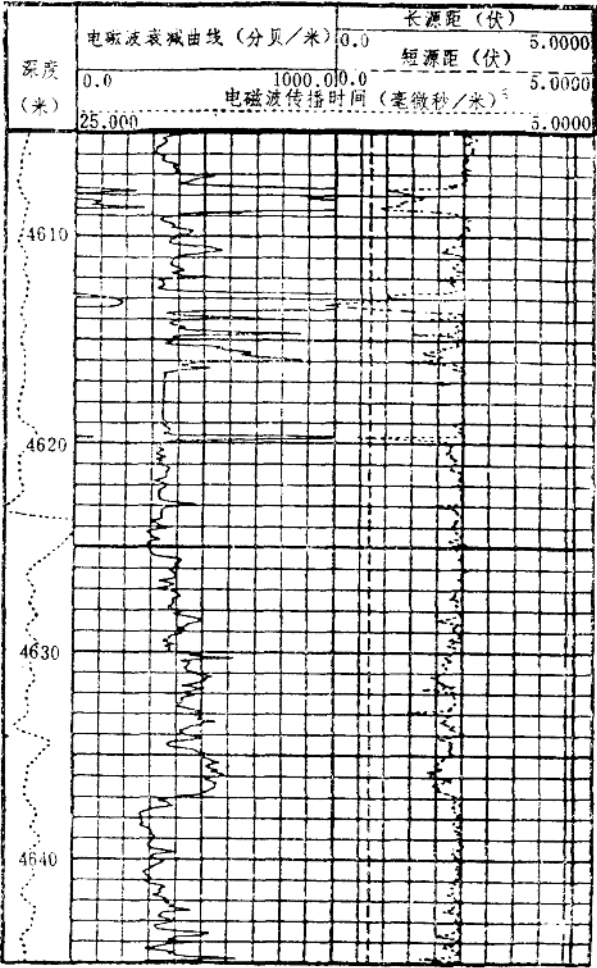


图 13 电磁波传播测井图