

# 第七章 裂缝性储层评价基础

以裂缝性储层为主构成的裂缝性油藏不同于常规储层油藏特征,此类油田开发面临的最主要矛盾就是对裂缝的评价,评价储层裂缝要比评价一般储层的孔隙度和渗透率复杂得多。本章主要介绍裂缝描述、探测和评价等方面的基础知识,了解裂缝性储层的基本特征。

## 第一节 裂缝性储层概述

### 一、什么是裂缝

从地质力学的观点上看,裂缝是失去结合力的表面(Van Golf - Racht,1982)。

因为破裂是导致给定的物体失去结合力的过程,于是裂缝是破裂的结果。所以,也可以说,裂缝是指物体发生破裂作用而形成的不连续面。

破裂(或断裂)是指施加给岩石的应力超过了其极限强度,从而发生某种程度破坏(断裂、破碎等)的现象。

一般说来,在破裂过程中发生相对位移的裂缝可定义为断层,而没有发生显著位移的裂缝可定义为节理,或狭义裂缝。

### 二、裂缝的成因

#### 1. 裂缝的力学成因

实验证明,岩石在应力不断增加的作用情况下,会由弹性变形到塑性变形,再到破裂。岩石开始破裂的应力值成为岩石极限强度,或简称强度。施加给岩石的应力可以分解为三种类型,张应力、压应力和剪应力。岩石类型和应力形式是决定岩石裂缝形成程度的关键因素,同一种岩石其抗张强度远比抗压强度要小得多(表 7-1)。

表 7-1 常温常压下岩石的强度极限(朱志澄等,1990)

岩石名称	抗压强度(MPa)	抗张强度(MPa)	抗剪强度(MPa)
花岗岩	148(37~379)	3~5	15~30
大理石	102(31~262)	3~9	10~30
石灰岩	96(6~360)	3~6	10~20
砂岩	74(11~252)	1~3	5~15
玄武岩	275(200~350)		10
页岩	20~80		2

从上表可以看出,任何岩石都会在相应的状态下破裂,只是其破裂的容易程度不同。最常见的沉积岩类储层都相对容易破裂。

裂缝的力学成因类型归纳起来主要有三种：

剪裂缝(Shearing fracture)——由剪切应力形成的，三个主应力都是挤压时形成的，剪裂缝具有位移方向与破裂面平行的特征。剪裂缝方向与最大主应力方向以锐角相交者一般相交为 $30^\circ$ ，而与最小主应力方向以钝角相交。剪裂缝之间的锐角称为共轭角(两者一般相交为 $60^\circ$ )。

扩张裂缝(extension fracture)——三个主应力都是挤压状态下诱导的扩张应力形成的裂缝，扩张裂缝具有位移方向与破裂面垂直并远离破裂面的特征。裂缝面与最大主应力和中间主应力平面平行，而垂直于最小主应力方向。扩张裂缝经常与剪裂缝同时形成。

拉张裂缝(tension fracture)——位移方向与破裂面垂直并远离破裂面，至少有一个主应力是拉张时形成的(应力值为负数)。

除此之外，从力学机制上看，还存在一种张裂缝与剪裂缝的过渡类型，即张剪缝。它是张应力和剪应力先后作用的结果，从破裂面上可以识别。

## 2. 裂缝形成的地质成因背景

在地下地质环境下，裂缝的形成受各种作用因素影响，既有岩石本身的，也有外在应力环境的，也有温压和流体性质的影响等等。同时，也可以有多期裂缝叠加作用，按裂缝形成时间可以分为同沉积缝、成岩缝、后期改造缝、压力释放缝、风化缝等，反映埋藏到上升剥蚀的过程。总之，裂缝的地质成因背景较复杂，按与地质作用相关的因素裂缝主要类型归纳起来包括构造裂缝、区域裂缝、成岩收缩裂缝、孔隙流体压力裂缝和风化裂缝等7种大类，10多种小类型。

构造裂缝——归因于局部构造事件或与局部构造事件相伴生的裂缝。包括与断层有关的裂缝系统、与褶皱有关的裂缝系统、与隆升上拱构造有关的裂缝系统和与外星撞击构造有关的裂缝系统4种类型。岩心中观察到的岩石裂缝，大多数构造裂缝是剪切缝(图7-1)。

与断层有关的裂缝系统：断层面即是剪切面。断层近旁的大多数缝是平行于断层的剪切缝，或与断层共轭的剪切裂缝，或者是等分这组剪切方向间锐角的张性裂缝。

与褶皱有关的裂缝系统：褶皱的构造变形史是非常复杂的，发育在褶皱中的裂缝组合也十分复杂(图7-2)。常见的有纵向张裂缝、横向剪切裂缝、共轭剪切裂缝、缝合线等。

与隆升上拱构造有关的裂缝系统：主要是与各类底辟构造(盐、泥质、火山作用等)和基底差异隆起构造(如披覆构造)有关。该类裂缝通常显环状分布或放射状分布。

与外星撞击构造有关的裂缝系统：外星撞击构造有关的裂缝。

区域裂缝——指那些在地壳上大面积内发育、方位变化相对较小、总是垂直于主层面的裂

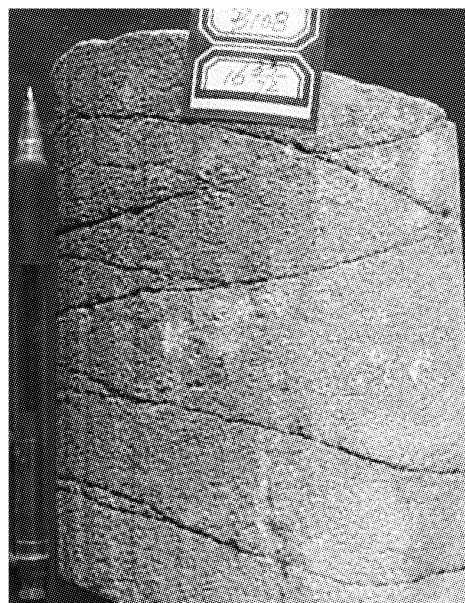


图7-1 岩心中观察到的两组不同裂缝组合形式

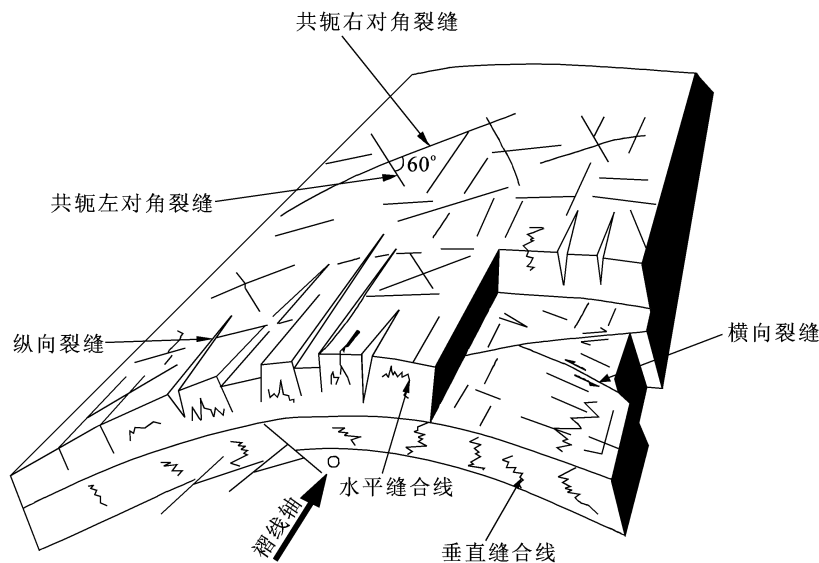


图 7-2 褶皱作用形成的各种裂缝类型与分布特征(Leroy, 1976,引自 Van Golf-Racht)

缝。区域裂缝与构造缝的主要区别在于：区域裂缝几何形态简单稳定；裂缝间距离相对较大；多为两组正交垂直缝；大面积内切割局部构造和多套层系。某些地震引起底大裂缝为区域裂缝。

**收缩裂缝**——类似成岩缝，是与岩石总体积的减少相伴生的扩张裂缝或拉张裂缝的总称。包括干缩裂缝、脱水裂缝、热收缩裂缝、矿物相变裂缝等。

**干缩裂缝**——主要指地表泥质沉积物由于干燥收缩形成底泥裂裂缝。裂缝平面上为多边形，垂向上为“V”字形。此种裂缝均被后期沉积物充填，基本无储集意义。

**脱水裂缝**——矿物在成岩阶段由于化学脱水作用造成沉积物体积减少而产生的裂缝为脱水裂缝。裂缝形态为多边状，连通性较好，多见于细粒和碳酸盐岩沉积物中。

**热收缩裂缝**——岩石在冷却过程中体积收缩形成的裂缝，在岩浆岩中多见，如玄武岩的柱状节理。

**矿物相变裂缝**——在成岩过程中，岩石物相的转变会产生相应的裂缝。如常见的有黏土矿物之间的转化、方解石向白云岩转化等。

**流体压力裂缝**——岩石孔隙压力增加会降低岩石极限强度，当流体压力超过其极限强度时，岩石会产生流体压力裂缝。高压流体可以来自地下压力封存箱；也可以是高水头造成；甚至可以是人工注水压力所致。流体压力裂缝均是张性裂缝。

**卸载裂缝**——由于地层抬升剥蚀，造成上覆压力下降，岩层扩张释放从而产生裂缝。

**风化裂缝**——岩层裸露受各种物理和化学的风化作用侵蚀，可以造成随埋深增加而发育程度降低的裂缝系统。这类裂缝对于不整合面之下古风化剥蚀储层意义重大，是各类基岩油藏重要的油气储集空间。

**缝合线缝**——缝合线是压溶作用的产物，是在碳酸盐岩成岩过程中常见的裂缝形式。缝合线多为封闭裂缝，对碳酸盐岩储层渗透率的改善作用不大。

### 三、裂缝性储层类型

以裂缝为主,或裂缝与孔隙,或裂缝与溶洞,或裂缝与孔隙和溶洞构成主要的油气储集空间的储层类型,可以理解为裂缝性储层类型,这类储层是不同于常规砂岩储层的非常规储层(姚光庆,2004)。以裂缝性储层类型为主构成的油气藏可以理解为裂缝性油气藏。随着油气勘探开发难度的增加,该类油气藏越来越多,是值得人们认真对待的一种油气藏类型。按岩性类型可分为5种裂缝性储层类型,即裂缝性碳酸盐岩储层(灰岩类、白云岩类)、裂缝性低渗致密砂岩储层、裂缝性泥页岩储层、裂缝性火山岩储层和裂缝性变质岩储层。

#### 1. 裂缝性碳酸盐岩储层(灰岩类、白云岩类)

无论是灰岩类还是白云岩类碳酸盐岩储层,按照储集空间类型可以分为5种储层类型:孔隙型、裂缝型、裂缝-孔隙型、裂缝-溶洞型和孔缝洞复合型。除了孔隙型碳酸盐岩储层之外,其他4种类型均与裂缝有关,可见裂缝在碳酸盐岩储层(灰岩类、白云岩类)中的重要性。

裂缝性碳酸盐岩储层形成了国外特大型油田的主体,尤其是裂缝-孔隙型储层。例如,中东地区伊朗的加奇萨兰(gachsaran)油田、阿贾加里(aghajari)油田和伊拉克吉尔库克(kirkuk)油田等储量巨大,由于裂缝发育导致渗透性极好,油田产量极高,成为世界上举世闻名的高产油田。

在国内,塔河油田(图7-3)、四川油田、任丘油田等大型油田也是举世闻名碳酸盐岩油藏,裂缝是主要的孔隙介质类型,对油田储量和产油能力均有很大影响(表7-2)。

表 7-2 任丘油田断层及裂缝发育与产能的关系(吴元燕等,1996)

断层密度 (条/km <sup>2</sup> )	裂缝断厚度占 地层厚度(%)	平均有效渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	平均采油指数 (10t/d·MPa)
1.5	42.1	1 740	342
1.3	53.8	1 560	264
0.48	34.7	350	143



图 7-3 塔河油田油藏模式图(张希明,2001,有改动)  
(阴影部分为含油孔洞;储层中的裂缝分布未标注)

## 2. 裂缝性低渗致密砂岩储层

按渗透性的好坏,砂岩类储层一般可以分为常规储层、低渗储层和致密储层三大类。关于低渗透储层的上限有两种意见,一是以  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为界;二是以  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为界。这里采用  $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为低渗储层的上界,并进一步分为低渗透储层、特低渗透储层、近致密储层、致密储层、非常致密储层和超致密储层 6 类(表 7-3)。

表 7-3 低渗透及致密储层分类(吴胜和等,1999,有修改)

储层类型	低渗透储层	特低渗透储层	近致密储层	致密储层	非常致密储层	超致密储层
渗透率 ( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	50~10	10~1	1~0.1	0.1~0.01	0.01~0.001	0.001~0.000 1
孔隙度(%)	一般大于 12		一般小于 12			
有效喉道半径 ( $\mu\text{m}$ )	大于 1.0		小于 1.0			

特低渗透以下级别储层,由于岩石致密,在构造作用、成岩作用或人工注水开采条件下,极易产生裂缝,裂缝在油气储集和渗流过程中起主导作用。我国陆相低渗、致密储层构成的油田特别丰富,尤其在中生代油藏中多见,例如吉林的新民、扶余油田,吐哈的鄯善、丘陵油田,长庆的延长油田,焉耆的宝浪油田等等。

## 3. 缝性泥页岩储层

成岩致密的泥页岩质层(含钙质、白云质、碱盐类、硅质等),在合适的成岩和构造环境下,会形成大量裂缝,构成有储集意义的裂缝性泥页岩储层,并形成油气藏。由于泥页岩类不存在孔隙和溶洞,裂缝成为其惟一储集介质,构成纯粹的裂缝性油气藏。潜江和济阳拗陷均有缝性泥页岩油藏发现。

## 4. 缝性火山岩储层

火山岩是火山作用的喷出岩石,其类型和岩相复杂,其自身可以有孔隙型储集空间,如火山碎屑岩和熔岩(玄武岩等)储层。但大多数火山岩储层是较致密的储层类型,裂缝的作用必不可少。我国中东部油区有许多火山岩油藏,如大港风化店、二连等地区有安山岩油藏;渤中、东营滨南、惠民商河、准噶尔等油区都见到玄武岩油藏等等,这些油藏的层位分布较广泛。该类油藏初期产量均较高,反映裂缝性储层特点较明显。

## 5. 裂缝性变质岩储层

变质岩储层油藏也主要是古潜山型油气藏,其裂缝性储层的形成主要有两个条件:一是有强烈的构造作用产生裂缝;二是要长期隆起剥蚀淋滤。往往在古不整合面附近具有这样的条件,从而形成裂缝性变质岩储层。我国酒泉盆地有产自志留系变质岩的油藏;辽河大民屯有太古界的变质岩油藏。国外在委内瑞拉和美国加州均有大型裂缝性变质岩油藏。

# 第二节 裂缝储层描述参数

对裂缝储层正确的认识是基于对裂缝基本参数特征的正确描述建立的,这些特征包括裂缝类型、裂缝(单条或多条)基本参数和裂缝岩石物性参数等。



## 一、基于描述准则的裂缝类型

在裂缝储层表征过程中,注意对以下裂缝类型的识别和区分,因为它们与成因和储层质量有关。

### 1. 天然裂缝与人工诱发裂缝

天然裂缝是在沉积物沉积或成岩过程中自然形成的裂缝。人工裂缝则是人工干预或诱发下产生的裂缝,包括取心过程中压力释放裂缝、人工储层改造压裂裂缝、核爆炸引发裂缝等。不同的裂缝在岩心中的表现是不同的,经仔细分析是能够区分它们的。

### 2. 可测量的和不可测量的裂缝

探测地下裂缝需要特定的技术手段,用某一手段能够测量出裂缝宽度、长度、方向性等特定参数的裂缝即可测量的裂缝。而那些不能够测量出裂缝宽度、长度、方向性等特定参数的裂缝即为不可测量的裂缝。在岩心中肉眼看得见,或通过显微镜看得见的裂缝是可测量的。不可测量的裂缝可能是未在岩心中出现的,或由于裂缝过分发育,造成岩心破碎(如角砾岩)的不能评价和描述的裂缝。根据可测量裂缝的成因和分布规律,用适当的方法预测井间不可测量裂缝的密度和分布规律,对裂缝性储层而言是至关重要的。

### 3. 大裂缝和微裂缝

用于实际储层描述时,裂缝大小可以用大、中、小等定性的术语加以描述。大裂缝和微裂缝术语的使用可以是相对的。根据裂缝切穿岩层的情况,可将裂缝分为层内裂缝和层间裂缝,或一级裂缝和二级裂缝。

### 4. 张开的裂缝和闭合的裂缝

张开的裂缝能够起流体通道作用,也称为有效裂缝,而闭合裂缝不能起流体通道作用,也称为无效裂缝。但裂缝的张开与闭合可以是随时间和地质环境的变化而变化的。有些取心观察是闭合的裂缝,在地下地层压力状态下,裂缝往往是开启的。在油气田开发阶段,早期闭合的裂缝随着注水量的增加,中后期也可以是开启的。当然,被成岩矿物胶结致密的早期储层裂缝,通常在后期一直是闭合的。

## 二、描述裂缝的基本参数

描述裂缝的参数包括诸如大小、方向、性质和种类等等,它们在空间的变化是如此的不规则和复杂,以致描述这样的—个裂缝系统要比常规的油藏困难得多。在裂缝描述过程中必须遵循这样一个过程,即从单一裂缝的局部基本特征开始;再考察多裂缝系统;最后在各组裂缝系统中建立关系空间和时间关系,确定裂缝在油藏中总体分布规律(图 7-4)。

### (一)单一裂缝参数

单一裂缝参数指的是裂缝固有的特征,诸如裂缝的张开度(宽度)、大小和性质,以及裂缝的方向等。

#### 1. 裂缝的宽度

裂缝的张开度或裂缝宽度可由裂缝壁之间的距离来表示。张开的宽度可取决于(在油藏条件下)深度、孔隙压力和岩石类型。裂缝宽度在  $10\sim 200\mu\text{m}$  之间变化,但统计资料已表明最常见的范围是在  $10\sim 40\mu\text{m}$  之间。

裂缝的张开度取决于岩石的岩性—岩相的特征、应力的性质和油藏的环境。在油藏条件下和地面条件(实验室)下的裂缝宽度之间的差别常常是因为实验室条件下岩样中的围压和孔隙压力已被释放掉所致。

### 2. 裂缝的大小

裂缝的大小指的是裂缝的长度和岩层厚度之间的关系,特别是当这些参数需要作出定性的评价时尤其有用。在这种情况下,裂缝可被评价为小的、中等的和大的。国内在碳酸盐岩储层描述中应用如下级别划分(表 7-4)。

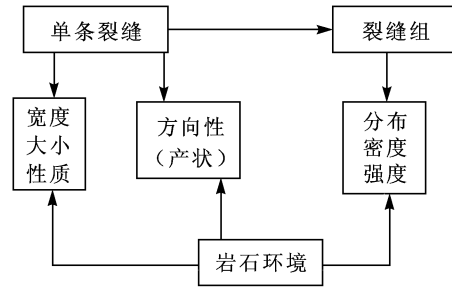


图 7-4 裂缝描述参数之间的关系图

表 7-4 碳酸盐岩储层裂缝分级(袁明生等,2000)

级别	名称	裂缝长度(m)	裂缝宽度(mm)
I	大裂缝	>10	>5
II	中裂缝	10~1	5~1
III	小裂缝	1~0.1	1~0.01
IV	微裂缝	<0.1	0.01~0.1

### 3. 裂缝的性质

裂缝的性质包括裂缝张开特征、裂缝充填情况和裂缝壁特性等。张开和闭合、充填与否、壁表面擦痕等特征都是反应裂缝成因和属性特征的重要性质。

### 4. 裂缝的方向或产状

裂缝在空间上是一个面(近似),准确的定位要通过走向、倾向和倾角这些产状参数加以描述,这与地质界面的描述方法是一致的。其中倾角大小是可以通过岩心和测井加以描述的参数,倾向和走向在单井资料中描述相对困难。

### (二)多裂缝参数

多裂缝储层是由裂缝和缝间基质岩块组成的集合体。研究的重点是破裂程度及多裂缝的空间组合关系。通常用以下参数描述。

#### 1. 裂缝等级(破裂程度)

裂缝的分布用破裂系数的等级来表示。如果在各裂缝体系中有连续的通路且各体系是彼此相等的,则这个系数将是较强的。如果在各裂缝体系中的相互连通受到阻隔,并且如果一个体系的破裂作用压倒其他体系,则破裂的等级将是较弱的(图 7-5)。

#### 2. 基质岩块单元

在各个方向上切割油藏岩石的裂缝,划分出了被称为基质岩块单元(blockunits)或简称基质岩块的岩体单元。

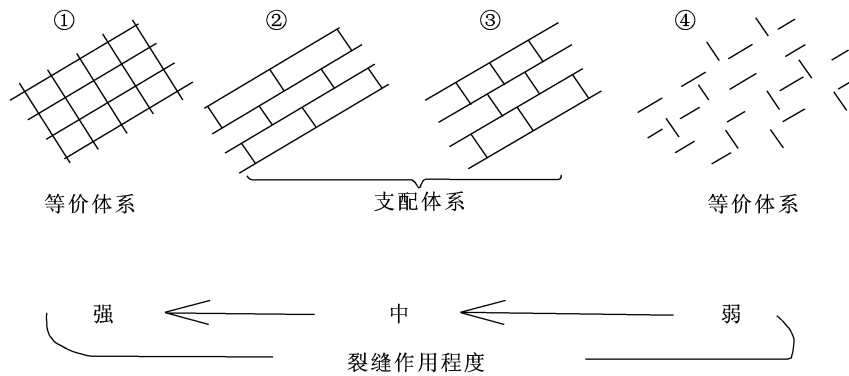


图 7-5 正交裂缝体系的各种组合和裂缝等级的定性评价(Ruhland,1973)

基质岩块是由裂缝体系的倾向、走向和分布的形状、体积和高度来确定的。基质岩块的形状是不规则的,但是在实际工作中,岩块单元被简化为简单的几何体积,诸如立方体或拉长的或高平的平行六面体。

Ruhland 通过简化的几何模型所描述的各种岩块形状各个岩块的基本尺寸联系起来。

### 3. 裂缝密度

裂缝密度通过各种相对的比值说明岩石破裂的程度。如果这一比值是对体积而言,则裂缝密度称为体积裂缝密度。如果这一比值是对面积或长度而言的,裂缝密度被称为面积或线性裂缝密度。这些密度的分析表达式如下:

体积裂缝密度( $V_{fd}$ ):裂缝总表面积( $S$ )与基质总体积( $V_B$ )的比值。

$$V_{fd} = \frac{S}{V_B}$$

面积裂缝密度( $A_{fd}$ ):指裂缝累计长度( $L$ )和流动横截面上基质总面积( $S_B$ )的比值。

$$A_{fd} = \frac{L}{S_B} = \frac{\sum_1^n l_i}{S_B}$$

式中: $l_i$ ——每条裂缝的长度。

线性裂缝密度( $L_{fd}$ ):指与一直线(垂直于流动方向)相交的裂缝的数目( $n_f$ )和此直线的长度( $L_B$ )的比值:

$$L_{fd} = \frac{n_f}{L_B}$$

线性裂缝密度也称裂缝率、裂缝频率或线性频率。

### 4. 裂缝强度

裂缝密度表示了单一层内裂缝的发育程度,如果考虑不同厚度和岩性层之间裂缝发育程度,可以用裂缝强度的概念。

按照 Ruhland 的研究,这个参数表示了裂缝频率( $FF$ )和岩层厚度频率( $THF$ )的比值。

$$FINT = \text{裂缝频率} / \text{厚度频率}$$

据统计, $FINT$  的大小代表裂缝带的发育程度:如果  $FINT$  大于 0.05,这实际上是个裂缝带;如果  $FINT$  为 0.1 左右,这是个中等的裂缝带;如果  $FINT$  为 5~10,这是个强裂缝带;如



果  $FINT$  为 20~50, 这是个非常强的裂缝带; 如果  $FINT$  大于 100, 这是角砾岩。

归纳起来裂缝描述参数见表 7-5 所示。

表 7-5 裂缝描述参数

单 条 缝	裂缝宽度 (开启与闭合)	$\epsilon = \epsilon' \times \cos\theta$ , 式中: $\epsilon$ 为裂缝面真实宽度(cm); $\epsilon'$ 为裂缝面视宽度(cm); $\theta$ 为测量面与裂缝面的夹角( $^\circ$ )
	裂缝的长度	裂缝的长度指在裂缝的走向上裂缝延伸的距离
	裂缝的产状	包括倾角、倾向、延伸方向及与层面的关系等。按产状分: 水平缝( $0^\circ \sim 15^\circ$ ); 低角度斜交缝( $15^\circ \sim 45^\circ$ ); 高角度斜交缝( $45^\circ \sim 75^\circ$ ); 垂直缝( $75^\circ \sim 90^\circ$ )
	裂缝的充填情况	裂缝中充填矿物的成分和分期性, 以及裂缝含油性
	裂缝壁	光滑, 或粗糙, 或阶梯面等
多 条 缝	裂缝网络	裂缝期次, 裂缝组合, 裂缝交叉, 以及基质岩块特征等
	裂缝间距	岩心上对于同一组系的裂缝应对其间距进行测量, 裂缝间距是指两条裂缝之间的距离( $e$ ), 裂缝间距的大小决定裂缝孔隙度的高低
	裂缝密度	体积裂缝密度 $V_{FD} = S/V_B$ 。定义: 裂缝总表面积( $S$ )与基质总体积( $V_B$ )的比值。 面积裂缝密度 $A_{FD} = L/S_B$ 。定义: 指裂缝累计长度 $L = n_f \times l$ 和流动横截面上基质总面积( $S_B$ )的比值, 式中 $n_f$ 为裂缝总条数; $l$ 为平均裂缝长度。也可以将单位面积上的裂缝条数称为视面积裂缝密度。 线性裂缝密度 $L_{FD} = n_f/L_B$ 定义: 指与一条直线(垂直与流动方向或指岩心的中线)相交的裂缝条数和此直线的长度的比值, $L_B$ 为所作直线的长度
	裂缝孔隙度	$\Phi_f = \frac{b}{b+h}$ 裂缝孔隙度( $\Phi_f$ )是裂缝宽度( $b$ )和间距( $h$ )的函数
	裂缝渗透率	$K_f = \frac{b^3}{12 \cdot h}$ 裂缝渗透率( $K_f$ )与宽度( $b$ )和层厚( $h$ )的关系

### 三、储层裂缝的孔隙性

裂缝储层的孔隙性相对单纯的孔隙型砂岩储层类型要复杂得多。裂缝的存在会造成双重孔隙介质或三重孔隙介质存在, 双重孔隙介质是指储层为裂缝孔隙和基质孔隙两种形式; 而三重孔隙介质是指储层为裂缝孔隙、基质孔隙和溶洞三种形式并存, 大大加剧了储层孔隙结构的非均质性程度。

岩石裂缝孔隙用裂缝孔隙度( $\Phi_f$ )表示, 定义为裂缝孔隙体积( $V_f$ )与岩石体积( $V$ )之比:

$$\Phi_f = \frac{V_f}{V}$$

储层裂缝孔隙度一般小于 1%, 因此当基质岩石孔隙度较大时, 评价裂缝孔隙度意义不大, 只有当基质岩石孔隙度很小时, 裂缝孔隙度才重要。

裂缝孔隙度可以通过裂缝宽度和密度资料、岩心薄片分析、三维岩心实验、测井资料等手段获得。上述裂缝面密度和体密度参数, 可以转化为裂缝面孔隙度和体孔隙度, 只要乘以裂缝平均宽度即可。

### 四、储层裂缝的渗透率

裂缝的存在对储层渗透性的影响远远大于其对岩石孔隙度的影响, 因而裂缝是与渗透性相关的储层重要评价参数。裂缝渗透率和基质岩块渗透率并存在裂缝储层中, 岩石总渗透率是二者之和。通常, 裂缝渗透率高出基质渗透率的数十倍到数千倍, 两者差异巨大。

### 1. 固有裂缝渗透率( $K_{ff}$ )

固有裂缝渗透率与流经的单条缝或裂缝网络有关,其渗透性大小与岩石基质无关。流体流动截面只是裂缝孔隙面积( $a \cdot b$ ,  $a$  代表裂缝截面长度,  $b$  代表裂缝宽度)。该渗透率与裂缝宽度和裂缝与流动方向的夹角有重要关系。若夹角为零,则下式成立:

$$Q = a \cdot b \cdot \frac{K_{ff}}{\mu} \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{l}$$

经计算,固有裂缝渗透可以用下式表达:

$$K_{ff} = \frac{b^2}{12}$$

### 2. 岩石裂缝渗透率(或常规裂缝渗透率)( $K_f$ )

在应用达西定律常规计算渗透率时,将岩石基质和裂缝统一作为流体流动单元考虑,不只是考虑裂缝截面,流动截面为裂缝长度( $a$ )乘以岩石单元厚度( $h$ )。此时的渗透率为岩石渗透率,或常用的裂缝渗透率。

$$Q = a \cdot h \cdot \frac{K_f}{\mu} \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{l}$$

经计算,岩石裂缝渗透可以用下式表达:

$$K_f = \frac{b^3}{12h}$$

### 3. 裂缝—基质系统总渗透率( $K_t$ )

由于岩石为多孔介质,总渗透率一般为裂缝渗透率和基质岩石渗透率之和:

$$K_t = K_f + K$$

对于裂缝储层渗透率的获取和计算没有直接的办法,不过有许多间接的方法可以用来获取裂缝渗透率,如岩心分析、薄片统计、试井分析、模型计算等。相关问题可以查阅相关文献。

## 第三节 裂缝性储层识别与评价

裂缝的探测和评价是在油田开发的勘探和开采不同阶段的各种作业里完成的。所用的方法和技术包括钻井、测井、地震、岩心、测试、开发动态分析等。其中的某些结果是直接资料,如在勘探阶段时在露头上的观察、在实验室里的岩心实验以及在测井过程中应用井下电视等。而另一类间接资料是在钻井测试、测井、采油等各种操作中获得的。除此之外,裂缝评价预测方面,常采用物理模拟、数学计算、地应力计算、数字模拟等方法。下面分别简单介绍。

### 一、储层裂缝直接识别

#### 1. 露头裂缝

露头裂缝,尤其是与地下储层有相似的岩性和构造环境的露头裂缝的研究是认识地下裂缝空间分布规律的钥匙。在露头区裂缝观察描述有一些得天独厚的优势,如裂缝走向、裂缝倾向、倾角、裂缝密度、大小、裂缝期次、连通性、充填情况、裂缝壁等等重要参数都是可以详细观察描述。在研究盆地边缘露头进行研究,可以作出与裂缝成因相关的构造应力场情况指导盆地内储层和成藏的研究,这样的参数通常是极其珍贵的。裂缝研究如同断层、节理一样,具体

观察过程中需要扎实的沉积学和构造地质学的野外工作方法。

图 7-6 展示了美国威斯康星州东北部 Silurian 白云岩野外露头景观。

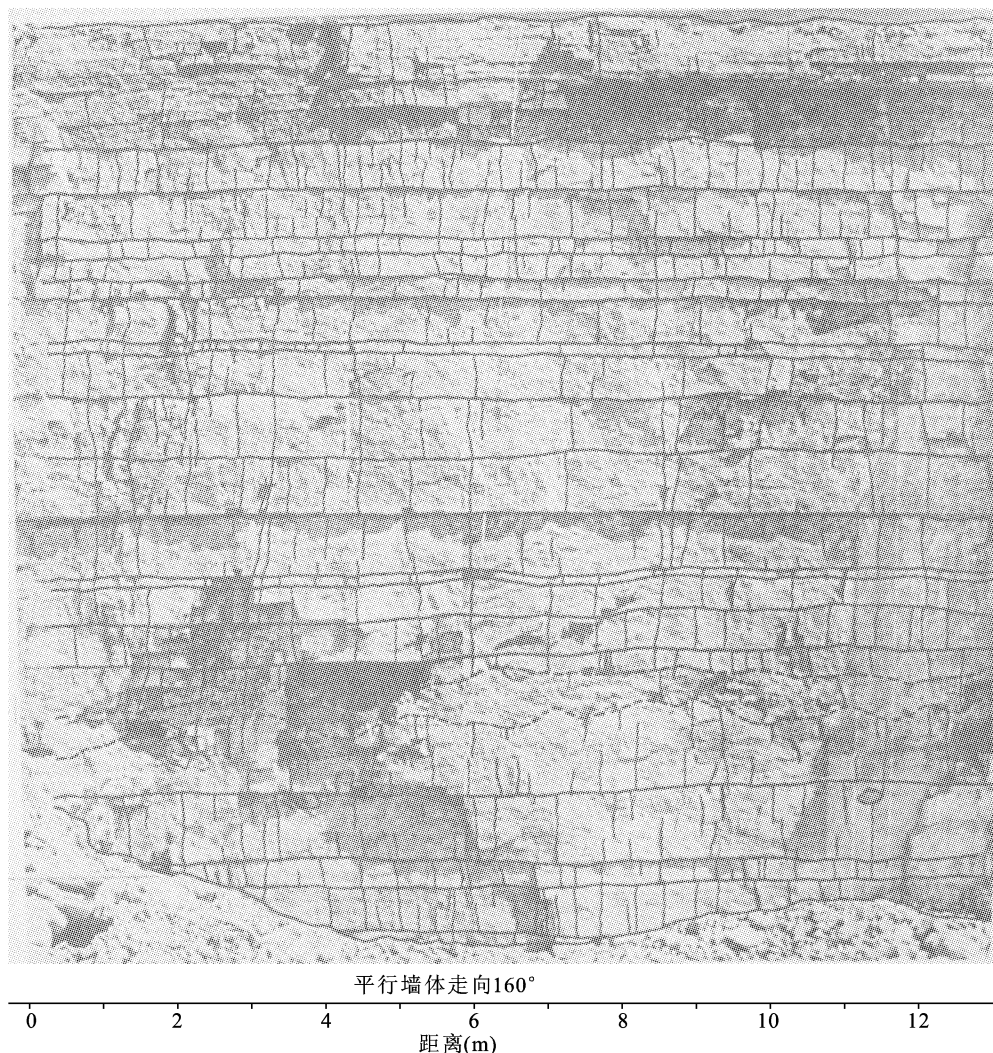


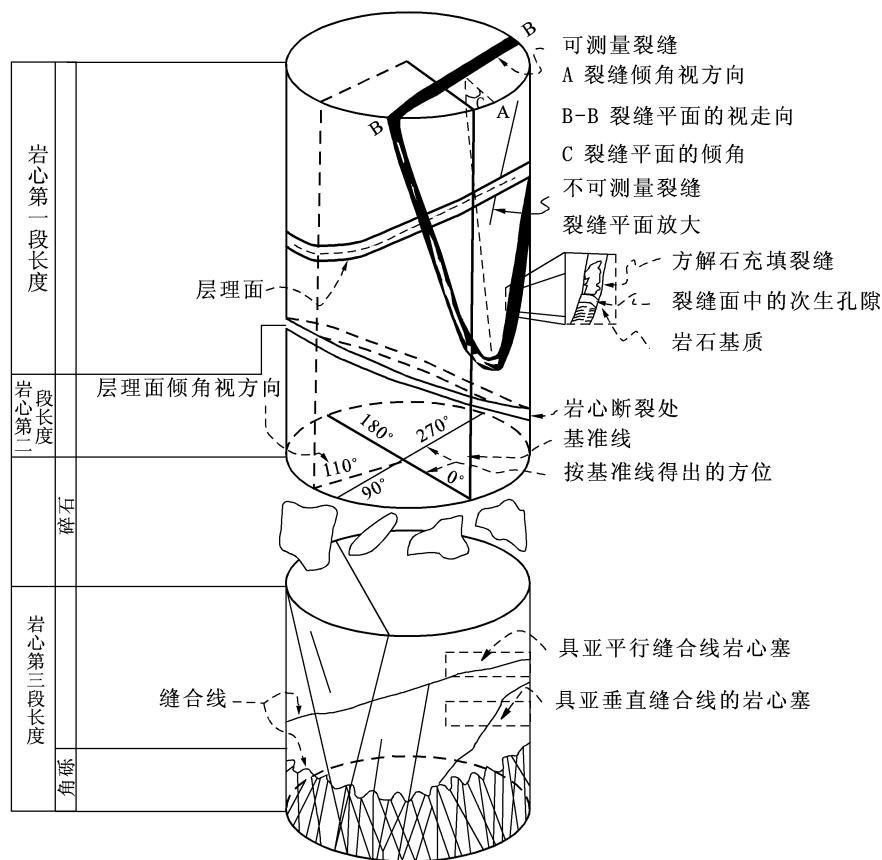
图 7-6 美国威斯康星州东北部 Silurian 白云岩野外露头景观(Underwood,2003)

## 2. 岩心裂缝

取心是直接观察地下研究层段的惟一直观方法,从中可得到一些能从露头得到的重要裂缝参数。与露头的区别在于岩心观察不能在横向上追踪裂缝变化;也不能单独确定其准确的方位变化(定向取心可以做到;配合倾角测井也可以解释方位)。一个裂缝复合岩心资料于图 7-7 所示。

在岩心裂缝观察中,应先详细描述裂缝赋存于岩石的岩石特征和层面特征;之后按前述的裂缝描述准则详细描述裂缝的属性特征,包括期次、相对方向、长度、宽度、切割性、充填性、张开度、闭合性、形状变化等等,并将观察到的数据建立相应表格作出详细记录。同时,还要在特定位置取样,作出薄片分析,进行微观裂缝描述。





由倾角测井测出的层理面真倾角方向为 $20^{\circ}$

图 7-7 一个裂缝油藏的复合岩心资料(Van Golf-Racht, 1982)

当然,岩心裂缝描述也有一些困难,必须注意以下几个方面的问题。

(1)对于裂缝发育带或裂缝密集段,岩心层段极易破碎,不能观察到实际情况。这时要注意破碎岩块的形态特征,尤其是岩块各个层面特征,区分裂缝发育程度。

(2)水平裂缝或低角度裂缝发育时,注意裂缝与岩石层面层理面的区别。前者是断裂面,可以切割岩石颗粒,并穿过各个级别的层面,后者是沉积界面,显示沉积学的沉积特征,层面规律性明显。尽量避免在真实的层理面与岩心中的任何显然的断裂面之间引起混乱。

(3)注意区分压力释放而产生的人工裂缝。取心过程中因岩层压力锐减,会产生晚期新鲜的高角度裂缝[图 7-8(A)所示],这类裂缝在地下不存在。而高角度早期裂缝往往层面不规则、含油、矿物局部充填、与其他次级裂缝伴生等等[图 7-8(B)所示],与前者区别明显。

(4)区分裂缝期次,识别无意义裂缝和开启的有意义裂缝。有些早期成岩阶段的裂缝多数被矿物质充填,对油气成藏和油水流动无影响,可以不作为重点研究。而那些长期开启的裂缝必须详细研究,详细记录分析。

## 二、钻井、测井裂缝识别

目前,还没有一种方法可以“看”到地下裂缝的全貌,尽管井下电视测井能够探测到全井段

的裂缝发育特征,任何一种探测裂缝的尝试都需要综合的方法。一般说来,各种方法都基于这一事实,即在井眼尺寸不变的均质地层中,裂缝带将在探测器的正常响应上产生异常。如果裂缝是张开的,则这种异常是相当大的,但如果是闭合的,则这种异常是微不足道的。尽管如此,人们还是从钻井和测井方面作出了极大努力来综合识别裂缝特征。

### 1. 钻井识别裂缝

一般说来,高渗透带的位置可有非常高的钻速、钻压降低、泥浆漏失、放空现象出现。泌阳凹陷白云岩油区钻井过程中,钻压大小、岩屑含油性、泥浆槽面显示等现象都可以反映地层裂缝和溶孔发育情况。经过对白云岩井区钻井完井地质报告的详细分析,发现白云岩地层中有众多的含油岩屑、荧光显示和泥浆槽面含油现象,累计有 15 层之多。泌 103 井在 E<sub>h</sub><sub>2</sub> 段还发生钻压放空 1.5m 的现象,证明存在裂缝—溶孔(或洞)带。

### 2. 测井识别裂缝

测井通常对在低渗透介质(由基质构成)中的高渗透率通道(由裂缝构成)的反应非常敏感。这种敏感性将包括裂缝被称为节理、洞穴、孔洞、裂隙等的测井响应。在依靠较高渗透带(与基质相比)的存在而进行裂缝探测时,用测井来探测裂缝只能限于那些张开或部分充填的裂缝。然而,对天然裂缝油藏的测井将永远无法把天然裂缝从人工诱导裂缝中区分出来。

测井将主要检测井眼周围的裂缝带,该处裂缝常常是垂向的或接近垂向的,而不是水平的。然而,对由于缝合作用或薄页岩串所形成的长度有限的裂缝必须特别给予注意。

不同的测井曲线对裂缝的测井响应不同,认识这些差异是识别地下裂缝的关键。

(1)岩性测井。在利用含量重晶石的泥浆钻井时,由于重晶石分子中所含钡元素的光电吸收指数很大,干扰了正常的岩性,使得  $P_{\gamma}$  曲线不能用来识别岩性。这时由于重晶石泥浆侵入裂缝带或裂缝带井壁形成含重晶石的泥饼,使裂缝带的岩性测井值急剧升高,成为判断裂缝带的标志。

(2)井径测井。裂缝带在井径测井曲线上常常显示为井眼尺寸的缩小(可能是由于厚的泥饼),这主要是使用了失水量高的泥浆。

一种相反的情况是井眼尺寸的拉长,这主要是由于在钻井过程中地层的破裂以及不同尺寸的岩块(特别是它们处于平行于井眼的裂缝之间)的崩落而引起的。这点常常可能在双直径四臂的井径曲线上看出来。

(3)井温测井。在井眼中较冷的泥浆循环降低了整个井筒的地温梯度,而在渗透性地层处理更明显。温度降低取决于地层的导热率、泥浆与地层之间的温差以及泥浆的侵入和泥浆的漏失。很明显,裂缝的存在增加了泥浆的漏失量(侵入量),将在泥浆循环过程中造成裂缝带中温度梯度的改变,或者以后在循环停止时出现温度在时间上的推移。但是裂缝组仅能用具有足够高的灵敏度和相当小的惯性影响的温度计才能探测到。

(4)电阻率测井。裂缝发育层段因钻井泥浆或泥浆滤液侵入地层,电阻率值明显降低,表

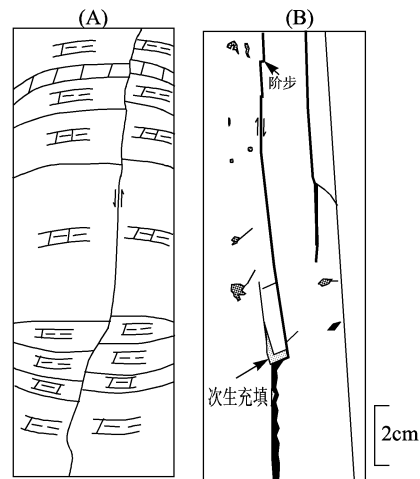


图 7-8 泌阳白云岩地层中岩心裂缝  
(A)人工裂缝;(B)原始裂缝



现为高值电阻率背景上的相对低值电阻率。为了检测低值电阻率的裂缝发育带,目前较有效的电阻率测井方法是采用深、浅双侧向(DLL)和微球聚焦测井(MSFL),使发射电流集中流入地层,从而减小井眼和围岩的影响。由于裂缝发育的不均一性,电阻率测井曲线形态常呈高低间互、起伏不平的多尖峰状。当裂缝较发育时,3条电阻率曲线都为低值显示;但当仅有孤立稀疏的小裂缝发育时,深浅双侧向降低不明显,而微球聚焦测井可为显著低值。

裂缝产状影响深浅双侧向曲线的幅度差,通常高角度缝(指与井轴之垂直平面夹角为 $75^\circ$ 以上)导致不大的负幅度差或深浅双侧向重合。当然和孔隙性储集层一样,地层含流体性质及钻井泥浆侵入地层的情况也是影响深浅双侧向测井曲线幅度差的因素之一。

(5)孔隙度测井:包括声波、中子和密度测井,是探测裂缝的有效工具之一。以声波测井为例说明如下。

裂缝在声波时差曲线上的反映与井筒周围裂缝的产状及发育程度有关,因声波按最短时间选择声程,传播过程中将尽可能绕过裂缝,因此声波时差对高角度裂缝反映较差。由于水平或低角度裂缝与声波传播路径正交,小裂缝可近似地看成孔隙,因此声波可以反映小的水平裂缝。但当遇到大的水平裂缝或网状裂缝时,声波能量急剧衰减,往往导致首波不能触发接收器,有待于后续波触发接收器,因而声波时差相应增大,显示出时差突然增高的跳跃现象,称作周波跳跃。

(6)裂缝识别测井或高分辨率倾角测井。裂缝识别测井(FIL)是利用高分辨率地层倾角仪进行测量。每次下井取得9条曲线,包括互成 $90^\circ$ 的4个极板上的4条微电导率曲线和井斜、方位、相对方位(1号极板和井斜方向的夹角)以及相互垂直的两对极板所测的井径曲线( $C_1$ 、 $C_2$ )。

水平裂缝的特点是4条电导率曲线在同一深度上出现一边倒的尖刺状异常(图7-9)。

斜交缝的特点是4条电导率曲线在不同深度上出现异常(图7-10)。

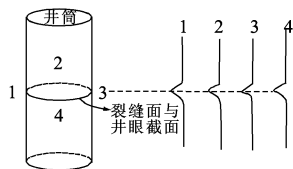


图7-9 水平缝 FIL 示意图

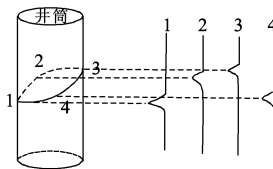


图7-10 斜交缝 FIL 示意图

(7)井下声波电视(BHTV)。井下声波电视仪实际上是一种声波扫描仪,它是利用声波的反射、折射原理用定向高频波对井壁进行 $360^\circ$ 全方位扫描,然后接受井壁回波信号,将反射幅度处理成图像,可以反映井壁裂缝发育情况,有类似声波扫描物体的效果。无裂缝井壁对声波能量吸收弱;回波信号强,图像为白色,裂缝位置由于回波能量相对较弱,在图像上呈暗色。

井壁均一性的变化,诸如裂缝、孔穴、坑穴等等以图像强度的变化而被反映出来。测井结果显示在平面上成为平的图像,其垂直比例尺相应于井深,而水平比例尺则相应于井眼的方位角。井下电视(BHTV)是一种用直接测量来探测与评价裂缝的装置。

(8)地层微电阻率扫描测井(FMS):地层倾角测井一样,也利用4个相互垂直的四个极板测定电阻率,但每个极板有16个电极,可以同时测出环空的16条曲线,并组成一个图像。通过灰度、颜色、亮度等处理可以给出一个清晰反映裂缝(主要是高角度裂缝)的扫描图像(图7-

11),实践证明,此类方法在碳酸盐岩裂缝储层中识别效果较好。

陈碧珏等(1987)以碳酸盐岩储层为例,详细总结了裂缝特征在测井曲线的响应特征(表7-6)。

### 三、裂缝综合评价与预测

井孔获得的裂缝数据是相对孤立、静态和局部的,要完整评价储层的裂缝特征,并能在未钻井区预测裂缝和储层质量,必须采用综合评价和预测手段。包括动态数据分析、单井数据统计分析、地应力分析、数字模拟等方法。

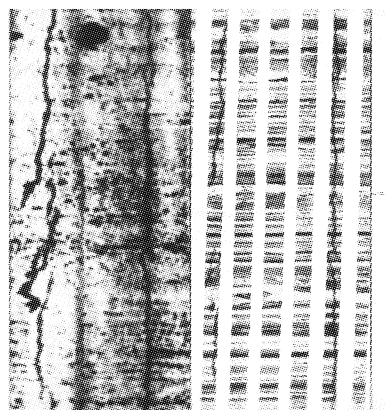


图7-11 高角度裂缝在地层微电阻率扫描测井(FMS)图中的显示

表7-6 碳酸盐岩中的裂缝在不同测井曲线上的响应(陈碧珏等,1987)

响应信息	低角度裂缝	高角度裂缝	网状裂缝	孔-缝带
裂缝识别	4条微电导率曲线均有异常,且深度、幅度都比较一致	异常出现在成对电极或某一、某三电极的电导曲线上;长度与裂缝长度一致	4条电导率曲线都有异常,但形状、深度段、密度不完全相同	明显的电导率增大异常但参差不齐
岩性测井	普通泥浆钻井时裂缝处无异常,泥浆中加重晶石则 $\rho_c$ 值增大。当形成泥浆饼时数值更高	$\rho_c$ 值无明显增高	泥浆中含重晶石的情况下 $\rho_c$ 值增高	与网状裂缝相同
变密度	曲线呈台阶状无“斜坡”效应,纵横有“人”字型干涉条纹	反差明显,纵横波初至清晰,后续部分有不规则扰动现象,以致看不到“人”字型干涉条纹	条带浅淡不清晰,干扰强烈	多重“人”字型条纹,辨认不清
波形	纵横波都衰减,横波衰减更大	纵波能量有衰减,横波能量衰减较小,波列后部畸变大	纵横波能量都严重衰减	纵横波能量都严重衰减
电磁波	泥浆侵入时有尖刺状异常	无明显异常	一片增大异常,呈毛刺状	普遍高的基础上还出现尖峰
双侧向	高阻剖面上的低异常形状尖锐呈星刺刀状,电阻率可低至几十个欧姆米,一般在 $100\Omega \cdot m$ 以下,有较小的负差异	中等电阻率,致密高阻背景上各有降低异常,但较平缓,有正差异,数值在 $100\Omega \cdot m$ 以上	在低电阻率的基础上,出现多个更低的尖峰	在大幅度低阻异常的基础上有更低的异常
补中	增大	略增,长度与裂缝长短一致	增大	增大
密度	减小	略减,长度与裂缝长短一致	减小	减小
声波 $\Delta t$	增大	无明显增大	增大	增大
井径	有时有缩径		缩径	缩径
备注		凡带推靠器的仪器响应,均与极板是否触及裂缝有关		

## 1. 数据统计分析

通过直线或间接探测到的储层裂缝参数基本数据,要经过充分处理后,才能更有效地反映裂缝宏观展布特征。

从岩心观察、实验以及测井等单井获得的资料必须通过统计图表或纯粹的几何表达方式加以处理。主要处理的资料如下:裂缝宽度、尺寸大小、性质、方向性、分布、岩块单元、密度和强度。

表示方式有两类:

(1)统计的方式:它包括直方图和统计立体图。在直方图里通过应用频率曲线指出单个参数(通过一定的标准最后选出的)最可能的平均值。主要用于裂缝取向定位的各种参数(走向、倾角等),并可以表示出裂缝优先出现的方向(图 7-12、图 7-13)。

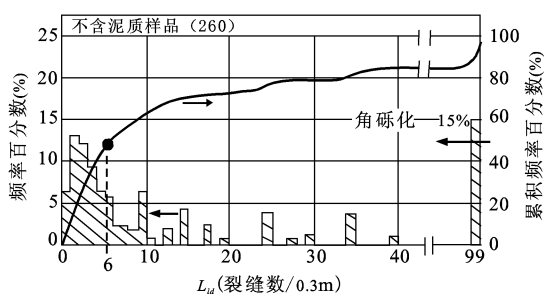


图 7-12 非泥质岩样的线性裂缝密度的频率曲线(引自 Van Golf-Racht, 1982)

(2)几何的方式:主要应用赤平投影,特别用于基质岩块单元的情形。极体视图和各种示意表示法在识别某一参数占优势的倾向方面特别有用,而且也有助于通过对大组裂缝的简化模式及其性质进行描述。

按要求完成数据统计分析和制图后,还必须充分结合地质资料,综合分析裂缝分布的地质规律,即裂缝分布研究必须考虑“统计图件+地质分析”的研究模式。

## 2. 动态数据分析

开发过程中,注采井的动态数据变化可以反映储层裂缝发育特征,尤其是裂缝发育方向及其开启渗透性好坏。因为,在有开启性的裂缝存在时,沿裂缝发育方向的渗透率有极大的优势,注入水会很自然地沿此方向突进,并造成产油井水淹。

图 7-14 表示一个 5 点法注采井组,周围 4 口井为注水井,中心井为采油井。在 NE 方向注入水快速推进,并很快造成采油井水淹,因此该位置存在沿 NE 方向延伸的开启裂缝,影响流体的动态变化。相反在 SW 方向,由于没有裂缝存在,渗透率相对低许多,这个方向的水推进速度较慢。

动态数据中,除了水淹快慢反映裂缝发育规律之外,地层压力变化同样也可以反映裂缝分布规律。

• 162 •

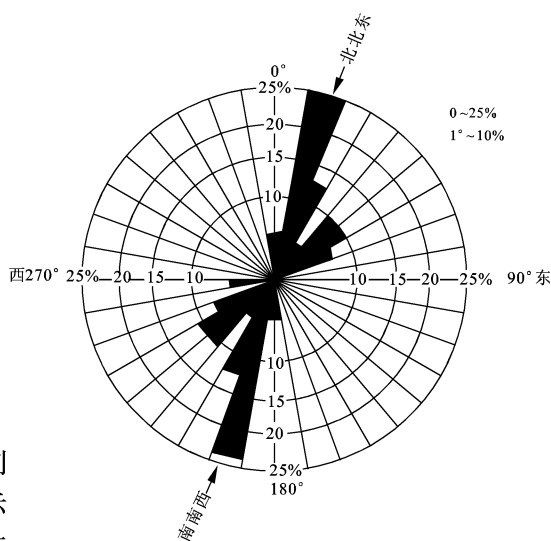


图 7-13 投影在一个统计的体视图上的裂缝走向(引自 Van Golf-Racht, 1982)

在判断突进注入水来自哪个方向时,人们通常采用在注入水中加入示踪剂,然后在采油井中监测这些示踪剂,从而可以知道高渗透的裂缝在哪个方向。

### 3. 地应力分析

在一定地质环境下,应力场的分布状态决定了本区裂缝系统的分布规律,尤其是裂缝分布与最大主应力方向关系密切,因此要想办法确定最大主应力方向,具体办法有以下几种。

(1)用波速各向异性方法测定岩心最大主应力方向。岩心从地层中取出时,要进行弹性释放,在应力最大的方向要出现微小的裂隙,进而被空气占据,会出现波速变慢现象。所以通过测量岩心小样的波速各项异性(三轴方向取样),可以得出三向应力分布趋势。波速越慢,应力越大;波速越快,应力也就越小。泌阳凹陷岩心测量结果与用岩石凯赛效应方法测定地应力值结果一致。

(2)利用岩石的古地磁偏角来确定地层中应力方向。岩石本身有磁性,沉积时按当时的磁性方向排列,这就是剩余磁性(古地磁)。波速各向异性方法测定岩心最大主应力方向和岩石凯赛效应方法测就地应力值只是在岩心中进行,不能在地下实际定向。而利用磁偏角就可以确定地下三维应力方向。

具体做法是:首先在地层露头中取样,测定样品的总磁偏角( $D$ )、磁化量和磁倾角。多个样品测定后可以取平均值。

然后,用波速各向异性方法和岩石凯赛效应方法得出岩心上水平最大主应力的古地磁偏角( $D'$ )等参数。 $D' - D$ 就是岩石在地层中水平最大主应力方向。

如果有定向取心资料,就可以直接从岩心中测得水平最大主应力方向。避免野外取样的困难。

(3)用井孔崩落掉块方向及地层倾角测井技术来确定最大水平主应力方向。钻井是在地层三维应力场状态下进行的,井孔内的应力在钻井中释放,但井孔周围的应力依然存在,当井孔周围水平最大主应力与最小水平主应力的应力差大于地层中岩石的剪切强度时,井眼就会产生崩落掉块,崩落掉块的方向是在水平最小应力方向(图 7-15)。

通常井眼是椭圆形井眼,其长短轴方向恰好分别与水平方向最小和最大主地应力方向相吻合。四壁地层倾角测井,可以给出椭圆形井眼的形状和方位。

由于断层等大尺度的断裂体系也是在与裂缝系统同样的应力状态下形成的,因此原则上可以用断裂体系模式预测裂缝分布模式。而断裂系统可以从大尺度上地震或航片解析中轻易得到。某地区详细解剖发现,大尺度上地震或航片解析的断裂平面分布,与小尺度上(如手标

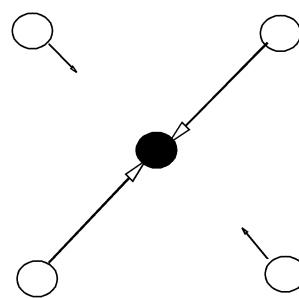


图 7-14 一个 5 点法注采井组  
裂缝延伸方向  
(空圈为注水井点,实圈为采油井点)

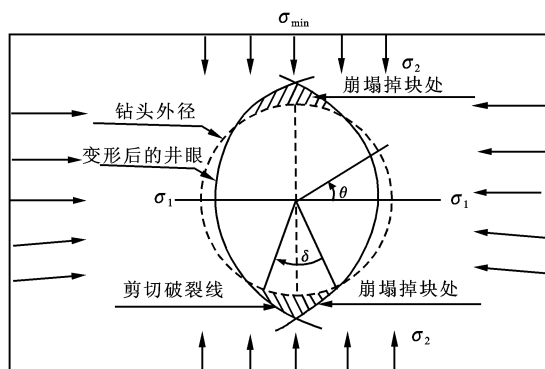


图 7-15 类椭圆形井眼及井壁的崩塌掉块示意图

本)裂缝分布有相同的规律,即具有自相似性(图 7-16)。这样两者的解释和分析可以相互关联,更有助于裂缝系统成因解释和分布预测。

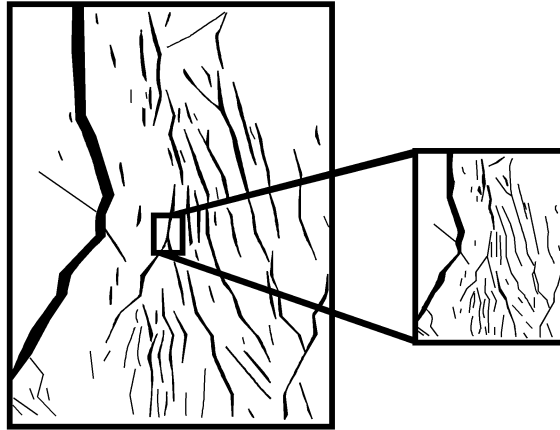


图 7-16 自相似断层模式(Yielding 等,1992)

#### 4. 数学计算与数字模拟

数学方法在裂缝统计分析中有重要作用,用这些方法解决了因数据不全而预测裂缝的困难。具体包括 Monte - Carlo 法、分形几何法、常规数学地质统计法、随机建模法、主曲率法(包括极值主曲率和高斯曲率两种方法)等等。

目前,有许多基于应力场分析的数字模拟软件,可以用于储层裂缝预测评价。