



DISHENTOU YOUQI CHUCENG LIEFENG YANJIU FANGFA

低渗透油气储层裂缝 研究方法

曾联波 柯式镇 刘 洋 编著

石油工业出版社

低渗透油气储层裂缝研究方法

曾联波 柯式镇 刘 洋 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了低渗透油气储层裂缝参数定量描述以及裂缝分布规律定量预测的地质、测井、地震、数值模拟和油藏工程等方法,反映了低渗透油气储层裂缝目前的研究现状和最新进展。

本书可供从事裂缝性低渗透油气藏勘探和开发的科研人员、工程技术成员、生产管理人员和有关高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

低渗透油气储层裂缝研究方法/曾联波,柯式镇,刘洋编著.

北京:石油工业出版社,2010.7

ISBN 978-7-5021-7459-0

I. 低…

II. ①曾…②柯…③刘…

III. 低渗透油层-裂隙储集层-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 137318 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:<http://www.petropub.com.cn>

编辑部:(010)64523543 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:12.25

字数:309 千字 印数:1—1000 册

定价:45.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

多年的油气勘探实践表明,裂缝性低渗透油气藏是我国含油气盆地中一种重要的油气藏类型,其探明地质储量已超过 40 亿吨,占目前探明油气资源总量的 1/3 以上,占“九五”期间以来探明油气资源总储量的 3/4 左右。有专家预测,在我国剩余的 130 多亿吨的油气资源量中,可能有 60% 左右的油气资源量分布与裂缝有关。因此,裂缝性油气藏的勘探和开发,在我国石油工业中的地位越来越重要。尤其随着我国以中高渗透层为主的老油田逐渐进入中高含水期开采,有效地勘探和如何合理地动用与高效开发这些裂缝性油气藏,这对我国石油工业的持续稳定发展,增强我国能源安全供应的保障能力,确保国家安全与经济协调、持续快速发展具有长远的战略意义。

据不完全统计,裂缝性油气藏从太古宇一直到新生界都有分布,其中以中生界为主。裂缝性油气藏的储层岩性包括低渗透砂岩、砾岩、泥岩、碳酸盐岩、火山岩和变质岩,其中以低渗透砂岩储层和碳酸盐岩储层为主,它们广泛分布在各含油气盆地中。裂缝是这类油气藏的有效储集空间和主要的渗流通道,控制着油气的富集规律,并影响着油气藏的勘探和开发方案部署以及油田开发效果。受构造、成岩、溶蚀、抬升及风化等多种地质作用的影响,裂缝的成因类型及其控制因素多,发育程度差异大,分布复杂,使得裂缝性油气藏的油气分布和渗流也非常复杂,勘探开发难度大。因此,储层裂缝分布规律研究对我国裂缝性油气藏的勘探和开发具有十分重要的意义。

近年来,随着国内外大量裂缝性油气藏的发现和投入开发,从油气勘探和开发的实际需要出发,围绕储层裂缝参数描述及其分布预测这一核心,对储层裂缝的分布规律进行了大量研究,取得了较大的进展,并相继提出了储层裂缝研究的地质方法、测井方法、地震方法、动态方法、实验方法和数值模拟方法等。笔者在十多年来从事储层裂缝形成、分布及预测的理论、技术、方法和应用研究的基础上,对国内外储层裂缝研究的技术与方法进行了系统总结和分析,并结合自己的研究成果编写了本书。本书试图从原理、方法和应用实例上反映目前储层裂缝参数描述及分布预测的地质、测井、地震、数值模拟及油藏工程等方法的现状和发展趋势。

本书是由曾联波、柯式镇和刘洋共同编写。其中,第一、二、六、七章由曾联波编写,第三章和第四章由柯式镇编写,第五章由刘洋编写,第八章由曾联波、柯式镇和刘洋编写,全书由曾联波统稿。在本书的编写过程中,得到中国石油大学(北京)资源与信息学院领导、专家和同事的关心、支持和指导,在此表示衷心的感谢。

本书的编写参考了国内外许多专家和学者公开发表的文献,在此对各位专家和学者深表谢意。书中对引用部份作了标注,由于参考文献较多,书中如有漏标之处,还请各位专家和学者谅解。

储层裂缝分布规律的研究和预测是一项世界性的难题,目前还有许多问题有待进一步研究和探索。笔者希望本书能为从事相关工作的同行提供帮助,使他(她)们节省查阅文献的时间,从高起点开展研究工作。同时,笔者还希望能够通过本书与广大同行进行深入交流,共同探讨、完善和发展储层裂缝研究的理论、技术与方法,为我国裂缝性低渗透油气藏的勘探和开发服务。由于笔者水平、经验和掌握的资料有限,书中肯定有许多不妥之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 储层裂缝类型与分布特征	(1)
第二节 储层裂缝早期识别	(7)
第三节 不同勘探开发阶段裂缝研究	(10)
第二章 储层裂缝地质分析方法	(14)
第一节 相似地表露头裂缝分析	(14)
第二节 岩心裂缝参数定量描述	(16)
第三节 微观裂缝定量分析	(32)
第四节 裂缝实验分析	(35)
第三章 储层裂缝常规测井识别与评价方法	(38)
第一节 双侧向测井	(38)
第二节 地层倾角测井	(48)
第三节 声波测井	(50)
第四节 井径测井	(54)
第五节 自然伽马能谱测井	(55)
第六节 地层密度测井	(56)
第七节 常规测井裂缝综合识别方法	(57)
第四章 储层裂缝成像测井识别与评价方法	(66)
第一节 井壁电成像测井	(66)
第二节 井壁声成像测井	(80)
第三节 偶极子和多极子声波测井	(86)
第四节 多分量感应测井	(93)
第五章 储层裂缝地震检测方法	(97)
第一节 地震勘探和裂缝地震检测方法分类	(97)
第二节 非定向裂缝地震检测方法	(99)
第三节 定向裂缝地震各向异性检测方法	(108)
第四节 多组裂缝地震检测	(128)
第六章 储层构造裂缝预测方法	(131)
第一节 构造应力场分析	(131)
第二节 构造主曲率法	(137)
第三节 基于构造应力场分析的裂缝预测方法	(140)
第四节 其他裂缝预测方法	(153)

第七章 储层裂缝油藏工程分析方法	(157)
第一节 裂缝性油藏基本开发特征	(157)
第二节 示踪剂分析方法	(158)
第三节 试井分析方法	(163)
第四节 注水动态分析方法	(169)
第五节 压力分析方法	(171)
第八章 储层裂缝研究展望	(172)
第一节 储层裂缝地质研究展望	(172)
第二节 储层裂缝测井研究展望	(174)
第三节 储层裂缝地震研究展望	(175)
第四节 储层裂缝三维地质建模	(176)
参考文献	(178)

第一章 绪 论

第一节 储层裂缝类型与分布特征

一、储层裂缝的分类

储层裂缝是指由于构造变形作用或物理成岩作用形成的、在储层岩石中天然存在的不连续面(Nelson,1985)。广义上讲,在地质历史时期的构造作用和非构造作用下产生的岩石破裂都可称之为天然裂缝;狭义上讲,天然裂缝主要是指储层在成岩过程中和在后期的构造变形过程中形成的节理和微型断裂构造,包括节理型裂缝和断层型裂缝两种类型(曾联波,1998)。节理型裂缝是指在岩石中形成的节理构造,裂缝的两侧无明显的位移,通常在岩层内发育,与岩层面垂直,并终止于岩性界面上。断层型裂缝沿其破裂面两侧有微小的错动,其中,高角度断层型裂缝又称为穿层裂缝,它们常切割微层理面,具有与正断层或逆断层相似的分布或组合特征;低角度或近水平断层型裂缝主要表现为近水平的顺层滑脱裂缝,一般在泥质岩层发育,在裂缝面上具有明显的擦痕或镜面特征。

对于储层裂缝的分类,不同的学者提出了不同的分类标准。Nelson(1985)根据岩石力学试验和裂缝的地质成因,提出了实验裂缝成因分类和地质成因分类标准(表1-1),将实验裂缝分为剪切裂缝、扩张裂缝和拉张裂缝三种基本的力学成因类型,并特别强调了扩张裂缝和拉张裂缝的不同。形成拉张裂缝时,至少需要岩石中的最小主应力(σ_3)是张应力而不全是压应力。只有能够确定裂缝是在拉张应力环境形成时,才能定为拉张裂缝,否则就应该属于扩张裂缝。在地质成因上,将储层裂缝分为构造裂缝、区域裂缝、收缩裂缝(包括干燥裂缝、脱水裂缝、热收缩裂缝及矿物相变裂缝)以及与地表因素有关的裂缝等类型。构造裂缝和区域裂缝都是由表面力形成的,其区别是把构造裂缝定义为与局部构造事件有关的裂缝,因而把与断层有关的裂缝系统、与褶皱有关的裂缝系统以及与刺穿、撞击等构造有关的裂缝系统归纳为构造裂缝。把那些在平缓地层大面积内广泛发育、方位变化相对较小、破裂面两侧无明显水平错断且总是垂直于主层面的裂缝定义为区域裂缝。与构造裂缝相比,区域裂缝的几何形态简单且稳定、间距相对较大并且在大面积内切割所有的局部构造。曾联波(2006)认为鄂尔多斯盆地中生界低渗透砂岩储层裂缝具有区域裂缝的这些分布特点,同时又表现出构造裂缝所具有的特征,因而将这类区域裂缝归纳为弱变形构造区的构造裂缝,即为在两期水平构造挤压作用下受岩层非均质性控制的单向剪切裂缝。

表 1-1 储层裂缝的成因分类(据 Nelson,1985)

实验裂缝的分类	天然裂缝的分类
1. 剪切裂缝 2. 扩张裂缝 3. 拉张裂缝	1. 构造裂缝(由表面力形成) 2. 区域裂缝(由表面力形成) 3. 收缩裂缝(由体积力形成) 4. 与地表因素有关的裂缝(由体积力形成)

裂缝的规模和尺度是进行裂缝分类的重要依据。根据裂缝的规模,可以将储层裂缝分为微观裂缝和宏观裂缝两种基本类型。所谓微观裂缝是指肉眼不能识别,必须借助于显微镜才可清楚识别的裂缝,其裂缝的开度通常小于 $40\mu\text{m}$,溶蚀以后的开度可大于 $40\mu\text{m}$;而宏观裂缝是指肉眼能够清楚地识别的裂缝,其裂缝的开度通常大于 $40\mu\text{m}$ 。王平(1993)将天然裂缝分为微裂缝和显裂缝,微裂缝是指裂缝的开度与岩石孔径处于同一数量级,其延伸范围小,互不连通,它提供的方向性补充渗透率与基质渗透率属于相同的数量级;显裂缝是指其开度超过储层岩石孔径一个数量级以上,延伸长度可以达到或接近层厚的规模,但一般不穿层,它在原始状态下就表现出裂缝渗透率的主导作用。这里的微裂缝和显裂缝的划分标准包括裂缝尺度和裂缝渗流作用大小的双重标准,而且可能更多的是渗流作用大小的标准。由于我们采取的观察手段和获取的资料有限,这种分类往往带有很多的人为因素。在油田开发早期,由于资料有限,我们很难判断裂缝的这种主导渗流作用,所以很多油藏工程师们认为是微裂缝或是隐裂缝,它们在地下是闭合的,对油田开发不起作用而不引起重视。在油田开发中后期,随着压裂改造和注水压力的提高,形成了规模大和连通性好的人工裂缝,部分天然裂缝也开始开启,裂缝的动态响应明显,因而油藏工程师们认为它们都是显裂缝了,对油田开发在起作用而加以重视。但实际情况并不完全是这样,随着油田注水开发,裂缝的响应特征从无到有,从弱到强,这是一个自然的发展趋势。在油田开发早期,裂缝的动态响应不明显,但并不能代表裂缝在早期不起作用,只是我们还不能够认识到它们在开发早期的作用而已。天然裂缝形成以后,只要裂缝没有被充填,它在地下的张开度一般不会小于储层孔隙的直径,它在地下的原始渗透率一般要比基质孔隙的渗透率高几倍、十倍甚至几十倍以上。如果我们在早期就认识到裂缝的这种渗流作用,并采取相应的措施充分利用裂缝的这种渗流作用,裂缝在动态上的响应特征可能就会推迟出现。因此,在进行储层裂缝分类时,在资料不足或认识不清的情况下,我们不应该简单地划分为微裂缝或是隐裂缝,以免对油田开发提供不可靠的信息和引起不正确的判断。在裂缝的研究早期,我们建议以裂缝的几何形态学分类为主,然后再对不同几何类型裂缝的储、渗作用进行综合评价,以确定裂缝对油田开发的影响。

柏松章(1997)在任丘碳酸盐岩潜山油藏的裂缝研究中,按照裂缝尺度,进一步将储层裂缝划分为大缝、中缝、小缝、穿层节理缝和层内节理缝等5个级别:大缝的长度大于 10m ,开度大于 5mm ,密度小于 0.1 条/ m ;中缝的长度为 $1\sim 10\text{m}$,开度为 $1\sim 5\text{mm}$,密度为 $0.1\sim 0.5$ 条/ m ;小缝的长度为 1m 左右,开度为 $0.1\sim 1\text{mm}$,密度为 $0.5\sim 10$ 条/ m ;穿层节理缝的长度为 $0.1\sim 1\text{m}$,开度为 $0.01\sim 0.1\text{mm}$,密度为 $10\sim 100$ 条/ m ;层内节理缝的长度小于 0.1m ,开度小于 0.01mm ,密度大于 100 条/ m 。这里虽然提出了裂缝级次的概念,但其分类的标准不统一,之间可以互相交织。比如,穿层节理缝和层内节理缝是按照裂缝与层理的关系划分的,在尺度上它们也可能属于大缝、中缝、小缝或尺度更小一级的裂缝中的一类。因此,根据裂缝的尺度,可以将储层裂缝划分为大尺度裂缝、中尺度裂缝、小尺度裂缝和微尺度裂缝等4个级别(John C. Lorenz 等,2006)。在通常情况下,裂缝的间距、高度、长度和开度等参数之间存在正相关关系,裂缝的规模越大,则裂缝的间距、高度、长度和开度也就越大;相反,裂缝的规模越小,则裂缝的间距、高度、长度和开度也就越小。裂缝级次的具体划分标准,在不同地区可以不一致,还应该考虑该区储层地质条件以及裂缝与层厚的关系等因素。

根据裂缝的倾角,通常还可以将储层裂缝分为水平裂缝、低角度缝、中角度缝、高角度缝和直立缝等五类。水平裂缝的倾角小于 10° ,低角度裂缝的倾角为 $10^\circ\sim 30^\circ$,中角度裂缝的倾角为 $30^\circ\sim 60^\circ$,高角度裂缝的倾角为 $60^\circ\sim 80^\circ$,直立裂缝的倾角等于或大于 80° 。裂缝的倾角是

影响钻井钻遇裂缝概率的重要因素,不同倾角的裂缝在岩心上进行统计时采用的方法不一样,需要进行校正。例如,直井钻遇水平裂缝和低角度裂缝时,其裂缝间距或密度可以在岩心上直接测量;而对高角度裂缝和直立裂缝而言,由于岩心的直径一般小于裂缝的间距,直井是否能够钻遇这些裂缝具有很大的随机性,在某一层位岩心上没有裂缝,并不表明该层没有高角度裂缝和直立裂缝。因此,对这些裂缝进行岩心裂缝密度的统计时,需要根据地层的倾角、井斜资料以及裂缝面与岩心轴之间的空间几何关系进行校正,否则按每米多少条所统计的结果毫无意义,反映不了储层裂缝的真实分布或发育情况。需要指出的是,裂缝的倾角与地层产状关系密切,在大多数沉积盆地,由于地层倾角较小或近水平,因而与层面近垂直的构造裂缝都表现为高角度裂缝。而在变形比较强烈的地区,地层产状变陡,此时与层面近垂直的构造裂缝有可能表现为倾斜裂缝、低角度裂缝甚至是水平裂缝,而本来与层理面一致的裂缝反而成为高角度裂缝。因此,裂缝倾角的分类有时也难以反映裂缝的成因类型,在研究裂缝成因及其分布时应引起注意。

天然裂缝通常在低渗透储层中发育。在我国,低渗透储层一般是指储层基质的空气渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的含油气储层。按照储层基质孔隙的渗透率大小,通常可以将渗透率为 $(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为常规低渗透储层,渗透率为 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为特低渗透储层,渗透率为 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为超低渗透储层(李道品,1997)。在成因上,低渗透储层包括由沉积作用形成的原生低渗透储层以及由成岩作用形成的次生低渗透储层两种类型。我国大部分低渗透储层往往不是由某一成因形成的,往往是由沉积和成岩作用共同造成的,其中成岩作用是形成低渗透储层的主要因素。低渗透储层经过强烈的成岩作用以后,岩石致密,脆性大,在后期的构造应力作用下,在低渗透储层中容易产生构造裂缝。除了在后期构造作用下形成的高角度构造裂缝外,在强烈的成岩过程中还往往产生大量近水平的成岩裂缝,不同成因和不同倾角的裂缝相互交织在一起,组成了低渗透储层的裂缝网络系统,使这些低渗透储层成为裂缝性储层。裂缝是这类低渗透储层的有效储集空间和主要的渗流通道,对储集层内流体的流动具有重要影响。

二、储层裂缝的分布特征

根据裂缝的地质成因,可以将储层裂缝分为构造裂缝、成岩裂缝、收缩裂缝、风化裂缝和溶蚀裂缝等主要类型,它们发育在不同岩性储层中。不同地质成因的裂缝具有明显不同的分布特征。

1. 构造裂缝

构造裂缝通常具有以下分布特征:① 裂缝分布广泛,延伸长,产状比较稳定;② 裂缝具有明显的规律性和方向性,裂缝走向往往随着构造线(褶皱枢纽或断层走向)的变化而改变;③ 裂缝中常见有方解石、石英等矿物充填;④ 裂缝面特征明显;⑤ 裂缝在排列形式上呈雁列排列,或具菱形结环、尾折等端部特征;⑥ 裂缝广泛发育在不同岩性的岩石中。从力学性质上,构造裂缝包括剪裂缝和张裂缝两类。剪裂缝的产状较为稳定(图 1-1),沿走向和倾向延伸较长,同一个方向上多条剪裂缝常呈雁列式排列;裂缝面较平直光滑,在裂缝面上常有擦痕甚至阶步特征,如果裂缝被矿物充填,其充填脉体宽度较均匀,脉壁较平直;发育在砾岩或含砾砂岩中的剪裂缝还常切割砾石或粗颗粒;在平面上,剪裂缝的尾端常以折尾、菱形结环或分叉的形式消失。

与剪裂缝相比,张裂缝的产状不稳定,延伸较短,宽度大(图 1-2),单条裂缝常呈曲折分

布;张裂缝面通常粗糙不平,无擦痕;裂缝常被矿物充填,其充填脉体宽度变化较大,脉壁不平直;发育在砾岩或含砾砂岩中的张裂缝常绕过砾石或粗颗粒,其裂缝面凹凸不平;在平面上,张裂缝通常呈不规则的树枝状或放射状组合形式。与单条张裂缝相比,追踪张裂缝一般呈锯齿状延伸较远,被追踪的两组裂缝通常为在相同的构造应力场作用下形成的一对共轭剪切裂缝,而且追踪张裂缝的延伸方向与其形成时期的构造应力场的最大主压应力方向一致。追踪张裂缝的存在对判断裂缝的力学性质、形成时期及其古构造应力场具有重要的参考意义。

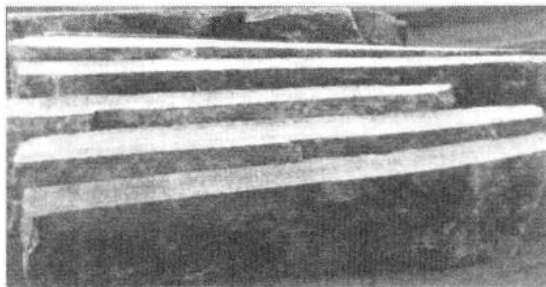


图 1-1 泥灰岩储层岩心上发育的剪切裂缝

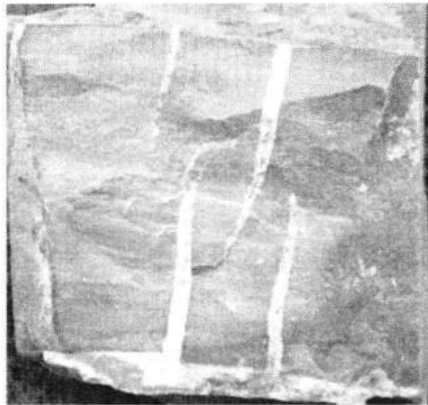


图 1-2 岩心上的张裂缝

区域裂缝作为构造裂缝的一种特殊的类型,发育在没有变形或弱变形(即断层和褶皱构造不发育的构造变形较小地区)的地层中,其分布同样具有构造裂缝的一般特征,只是由于这些地区的地质构造条件简单,其裂缝的表现形式也更简单。裂缝的发育范围更广,分布很规则,裂缝的产状稳定,规模大,延伸长,间距宽,等距性好,并通常与层面垂直等(John C. Lorenz, 1991)。这类裂缝一般以两组正交的形式分布,Price(1982)认为在大多数情况下这两组裂缝方向分布与盆地的长轴和短轴平行。对这类裂缝的成因解释目前仍不清楚,从板块构造、地壳抬升、基底断层活动到地潮(疲劳)都有,但都没有证据证明是结论性的。曾联波(2007)认为鄂尔多斯盆地这种区域性分布的裂缝系统的成因与岩层非均质性有关。

2. 成岩裂缝

在岩石成岩过程中形成的成岩裂缝也是低渗透储层中常见的裂缝类型之一,广泛分布在低渗透碎屑岩储层和碳酸盐岩储层中。成岩裂缝最常见的表现形式是层理缝,通常具有以下分布特征:① 裂缝主要顺微层理面分布,因而在大多数情况下表现为水平裂缝。但在地层产

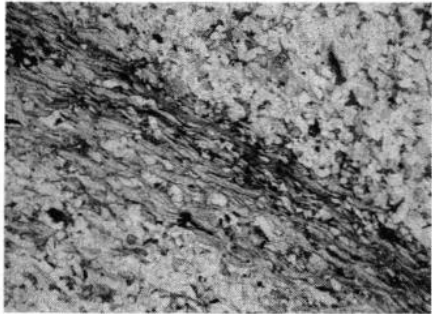


图 1-3 薄片上顺层分布的成岩裂缝

状变陡的地区,层理缝就表现为高角度裂缝。此时,顺层理缝通常发生层间滑动等现象,使裂缝的性质由成岩裂缝向顺层滑脱裂缝转变,如柴达木盆地西部地区泥灰岩储层中一些成岩裂缝就是这样;② 成岩裂缝通常平行于岩性界面分布,裂缝的分布方向与塑性矿物(如压扁的云母)的定向排列方向一致(图 1-3),这也是为什么这类裂缝是成岩成因而非抬升剥蚀造成的卸载成因的证据之一;③ 成岩裂缝常沿层理面具有断续、弯曲、尖灭、合并或分支等分布特点,反映了这些裂缝的形成是在储层的长期演化过程中同步形成的。

另一类成岩裂缝是分布在特(超)低渗透碎屑岩储层中的粒内缝和粒缘缝(曾联波, 2005)。粒内缝分布在矿物颗粒内部, 不超过矿物颗粒的边界, 主要为长石的解理缝和石英的裂纹缝; 粒缘缝通常与粒内缝相伴而生, 顺矿物颗粒的边缘分布, 因而也叫贴粒缝。粒内缝和粒缘缝的形成与构造侧向挤压和强烈的压实压溶等作用造成的矿物颗粒相互挤压有关(曾联波, 2008)。在构造变形较弱的地区(如鄂尔多斯盆地), 由于侧向挤压强度小, 其粒内缝和粒缘缝的形成主要与强烈压实压溶等作用有关, 因此应该划分为成岩裂缝的范畴。但在构造挤压强烈的地区, 粒内缝和粒缘缝的形成除了与压实压溶等作用有关外, 还与构造的侧向挤压作用有关, 此时就不宜再划分为成岩裂缝了, 这也说明裂缝的分类一定要和实际的地质条件联系。成岩裂缝的形成与分布受沉积微相和成岩作用的控制, 虽然它分布广泛, 但往往在某些部位呈密集发育, 是提高低渗透储层水平渗透率和单井产能的重要因素。

3. 收缩裂缝

收缩裂缝是由于岩石体积减小而形成的拉张裂缝。形成收缩裂缝的原因包括干燥作用、脱水作用、热收缩作用和矿物相变作用等。由于干燥作用形成的干燥裂缝一般发育在泥岩中(称为泥裂), 与泥岩暴露地表后在干燥状态下的失水收缩有关。干燥裂缝的规模小, 主要分布在泥岩层的表面, 在平面上呈多边形, 规律性差, 其张开度大, 在垂向上常表现为上宽下窄的“V”字形, 并常被后期沉积物所充填。脱水裂缝主要是由于岩石失水而形成的扩张裂缝或拉张裂缝。与干燥裂缝不同的是这类裂缝主要在水下或地下形成, 并可以出现在页岩、泥岩、粉砂岩、石灰岩、白云岩甚至细砂岩至粗砂岩中(Nelson, 1985)。这类裂缝也称之为鸡笼状裂缝, 通常呈三维多边形的网络状分布, 它是一种化学形成过程。

热收缩裂缝主要是岩浆岩在冷却过程中发生热收缩作用形成的张裂缝, 最典型的就是玄武岩中的柱状节理(图 1-4)。节理的横断层通常呈四边形至七边形等多种形态, 切割深度大, 发育密集, 可以成为良好的储集空间, 如美国犹他州盐湖地区 West - Rozel 油田古近系玄武岩柱状节理中的油气产量高达 140t/d。矿物相变裂缝主要为沉积岩(碳酸盐和黏土)和变质岩的矿物相变引起体积减小形成的裂缝。例如, 方解石向白云石的化学转变可以导致 13% 的体积减小, 这种相变收缩通常可以形成鸡笼状的裂缝, 与其他收缩裂缝相类似。

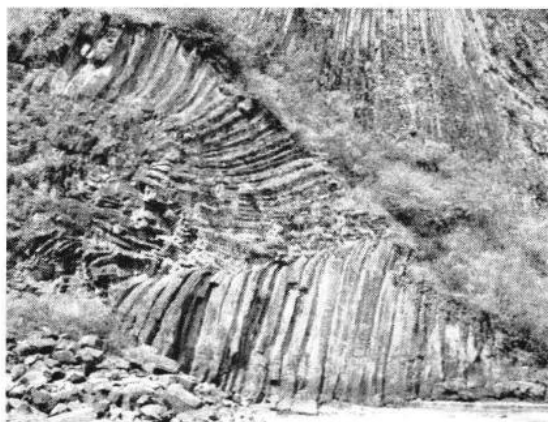


图 1-4 云南腾冲的柱状节理

4. 风化裂缝

风化裂缝主要分布在潜山油气藏顶部的风化壳中, 在长期的抬升和剥蚀过程中, 由于物理风化作用和化学风化作用形成。风化裂缝一般呈蜂窝状, 常被红色的含氧化物的黏土物质充填。地表外动力地质作用除了在潜山油气藏的顶部形成风化裂缝以外, 还常形成有一类卸载裂缝。这类裂缝一般分布在地表附近, 在形态上呈不规则状, 通常与自由表面近平行, 它们的形成与地表岩石的剥落和松弛膨胀有关。

值得注意的是, 与表面有关的风化裂缝及卸载裂缝通常和其他裂缝(尤其是构造裂缝)发育在一起, 风化壳以及风化裂缝和卸载裂缝的分布与地形的起伏有关。在山体的顶部, 风化作

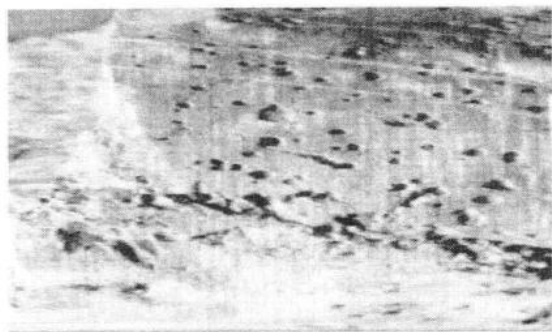


图 1-5 石灰岩中的次生溶蚀孔洞沿裂缝分布

带,裂缝呈水平状。值得注意的是,沿早期构造裂缝或成岩裂缝的溶蚀现象极为普遍,并在任何一种岩性中都存在,尤其在碳酸盐岩储层中,一些次生的溶蚀孔洞常常沿裂缝发育(图 1-5)。这里需要把溶蚀裂缝与沿早期其他成因裂缝发生的溶蚀作用区分开来,后者不能称之为溶蚀裂缝。

在纵向上,潜山油气藏可以划分为风化壳、垂向渗滤带和横向潜流带,裂缝在这三带中的分布特征有所不同。例如,在辽河盆地的某潜山油藏,位于潜山顶部的风化壳厚度一般为 13~75m,最厚为 136m,以构造裂缝和风化裂缝为主,伴有地表水较强烈的溶蚀作用,并有褐色铁质物和黏土矿物充填,在电性上以低电阻为特征。风化壳至古潜水面之间为垂向渗滤带,其厚度一般为 10~70m,最厚为 180m,该带以构造裂缝为主,并有地表水在重力作用下沿高角度裂缝向下快速渗流时发生选择性溶蚀作用形成的串珠状裂缝溶蚀孔洞,在自然伽马能谱测井上以明显的低铀带为特征。在古潜水面附近为横向潜流带,其厚度一般为 100~300m,最厚可达 500m,主要发育有构造裂缝和地下潜水横向流动时发生的非选择性溶蚀作用形成的近水平溶蚀裂缝,在自然伽马能谱测井上以明显的高铀带为特征。

6. 卸载裂缝

卸载裂缝是由于上覆地层的侵蚀卸载而诱导形成的裂缝。卸载裂缝的形成通常有以下两种机理:一是由于上覆地层的侵蚀作用,使得岩层的负载减小,应力释放,岩层内部则通过力学上薄弱的界面产生膨胀、隆起和破裂,从而形成近水平的裂缝,其分布与地形的起伏关系密切。二是如果地形起伏较大,会造成在一定范围内的侵蚀厚度变化较大,则地下岩层所承受的静水压力在横向上会出现差异,在流体压差作用下会发生流体的横向运移,若运移的流体与深部高压剖面或连续含水层相通,会大大增加流体压力梯度,从而可能在岩层中形成天然的水压裂缝。

7. 岩溶裂缝

岩溶裂缝是指与碳酸盐岩的岩溶发育有关的裂缝。在碳酸盐岩的溶洞发育过程中或溶洞形成以后,由于上覆地层的自身重力作用,通常在溶洞的顶部发生坍塌,同时形成岩溶裂缝。因而岩溶裂缝一般分布在溶洞的顶部,呈环状发育。由于在溶洞顶部的岩石中通常存在早期构造裂缝,岩溶裂缝可以在早期构造裂缝的基础上进一步发育和扩展,甚至可以延伸至地表形成地裂缝。

8. 隐爆裂缝

隐爆裂缝是指在隐爆角砾岩形成过程中产生的裂缝,主要发育在火山通道的隐爆角砾岩中,裂缝将岩石切割成角砾状。例如,在辽河油田东部凹陷中段发育古近纪次火山岩,岩性为

用更强烈,其风化壳厚度大,风化裂缝和卸载裂缝发育,它们和构造裂缝相互交织在一起,再加上地表水的长期淋滤作用,使得其储集条件优越,它们在潜山油气藏的顶部可以形成极好的储层。因此,潜山构造的高部位通常是油气的重要富集区。

5. 溶蚀裂缝

溶蚀裂缝主要分布在可溶性的碳酸盐岩储层中,裂缝的宽度大,形状不规则。在垂向渗滤带,裂缝的产状近直立;而在横向潜流

粗面斑岩。粗面斑岩形成时岩浆体的顶面埋藏深度小于 1000m,当岩浆从深处上升到浅部环境以后,在岩浆的定位过程中与冷的围压接触,在接触的边缘首先形成冷凝壳。并由于压力降低,岩浆中各种挥发成分从深部逸出至冷凝壳内聚集,当它们聚集到一定程度时,会发生剧烈的爆炸作用,使冷凝壳破碎形成隐爆角砾岩,并伴生隐爆过程形成隐爆裂缝,它们同样是油气的重要储集空间(陈庆春等,2003)。

第二节 储层裂缝早期识别

一、储层裂缝的早期识别特征

要在一个低渗透油气田开展储层裂缝研究,首先要识别该油气田的储层中是否存在天然裂缝。储层裂缝通常可以通过岩心、薄片、测井、钻井、产能及动态等资料进行识别,同时还可以通过相似地表露头的地质调查来间接地分析和判断。

在低渗透储层的钻井过程中,钻井液漏失通常是钻遇裂缝带的表现。例如,从吐哈盆地某地区低渗透砂岩储层的 5 口井的钻井液漏失量来看,钻井液的漏失多少与裂缝密度具有很好的一致性。如 Q1、Q2 和 Q3 三口井的钻井液漏失量都在 200m³ 以上,其对应层位的裂缝线密度都大于 0.55 条/m;Q4 和 Q5 井的钻井液漏失量都小于 100m³,其对应层位的裂缝密度明显较小,裂缝线密度为 0.4 条/m(表 1-2)。东部某低渗透砂岩油田的钻井液漏失量为 160 ~ 207m³,其统计的储层裂缝密度都在 0.6 条/m 以上,最大可达 1.2 条/m 以上。因此,钻井液漏失层位和钻井液漏失量多少可以作为这种致密低渗透储层早期判断裂缝是否存在以及在不同层位裂缝相对发育程度的定性参考依据。

表 1-2 某低渗油田钻井液漏失与对应裂缝密度分布情况

井号	深度 (m)	层位	钻井液漏失量 (m ³)	对应层位的裂缝密度 (条/m)
Q1	2315.0 ~ 3681.0	J ₂ q—J ₂ x	745.0	0.69
Q2	3268.0 ~ 3607.0	J ₂ x	420.0	0.57
Q3	3020.0 ~ 3393.0	J ₂ x	205.0	0.58
Q4	3361.0 ~ 3381.0	J ₂ x	72.2	0.4
Q5	3621.0 ~ 33631.0	J ₂ x	65.5	0.4

裂缝不仅是低渗储层的有效储集空间,而且还能提高储层的渗透性能,影响着低渗透储层的油气富集规律及其产能的高低。例如,在西部某低渗透砂岩油田储层裂缝发育的部位,不仅其有效渗透率明显增大,而且其产能明显变好(表 1-3 和表 1-4)。裂缝对油气井产能的影响在开发早期表现十分明显,而与累积产气量的关系没有早期试油产能那么明显,主要与裂缝所起的作用有关。低渗透砂岩储层的储集空间主要为原生和次生孔隙系统,虽然裂缝是其有效的储集空间,但裂缝的孔隙度较小(通常小于 0.3%),裂缝主要起渗流通道的作用。在油气井打开的早期,其采出的油气主要来自裂缝系统,当裂缝系统中的油气采出以后,由于基质孔隙与裂缝系统的交换能力较弱,使得基质孔隙中的油气难以渗出。因此,裂缝性油气藏的油气单井产能通常表现为早期产量高,但产量下降速度较快。只有当油气井同时钻遇裂缝发育带和孔隙发育带时,才能获得较长时间的高产稳产;否则,如果只钻遇裂缝发育带而没有钻遇孔

隙发育带时,虽有早期的高产,但稳产时间极短;如果只钻遇孔隙发育带而没有钻遇裂缝发育带时,只能获得长期的低产。

表 1-3 西部某低渗透气田裂缝密度与有效渗透率及产能关系数据表

井号	井段 (m)	有效厚度 (m)	日产气量 ($\times 10^4 \text{ m}^3$)	层压力恢复测试的有效 渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	平均裂缝密度 (条/m)
D1	3382.0 ~ 3434.0	44.2	3.79	0.13	0.4
	3105.0 ~ 3141.5	33.0	11.64	1.45	0.67
D2	3364.4 ~ 3406.0	38.6	3.18	0.35	0.07
	2642.0 ~ 2656.5	14.6	29.44	17.34	1.07
D3	3381.2 ~ 3442.0	54.8	9.18	4.79	0.58
D4	3181.8 ~ 3189.0	23.6	4.84	0.66	0.21
	3194.0 ~ 3217.0			0.67	
D5	3333.6 ~ 3387.4	47.7	24.36	7.59	0.38

表 1-4 东部某低渗透砂岩油田裂缝密度与油气产能关系数据表

井号	深度(m)	油和气的产量(t/d 或 m^3/d)	裂缝密度(条/m)
L1	3520.0 ~ 3592.9	185	1.38
L2	3416.5 ~ 3642.8	油:26.9;气:2621	1.25
L3	2891.8 ~ 2985.4	18.4	0.29
L4	2988.0 ~ 3002.0	8.2	0.62
L5	3069.4 ~ 3074.0	8.5	0.65
L6	3066.5 ~ 3070.6	6.3	0.73
L7	3138.1 ~ 3210.3	7.5	0.59
L8	2548.6 ~ 2679.0	2.98	0.17

在储层裂缝发育的层位,容易出现大量有方向性的井径崩落或垮塌现象(图 1-6),这也是识别裂缝存在以及判断裂缝发育方向的有效方法之一(袁士义等,2004)。从大量的统计资料来看,如果裂缝方向与现今地应力的最小主应力方向平行,则井径崩落或垮塌更为严重,方向性更明显,井径崩落方向与现今地应力的最小主应力方向一致;如果裂缝方向与现今地应力的最大主应力方向平行,则井径崩落或垮塌沿着裂缝方向发展,此时井径崩落方向与现今地应力的最大主应力方向一致,而不是与最小主应力方向一致;如果裂缝方向与现今地应力的最大主应力方向斜交,则井径崩落长轴方向一般仍沿裂缝方向发生,此时井径崩落方向与现今地应力的主应力方向无关。因此,在储层裂缝发育的地区,利用井径崩落的椭圆方向判断地应力方向时一定要特别小心,还必须参考其他的地应力测量方法来综合分析,否则容易造成误差。

除了钻井资料和试油资料以外,通常可以利用岩心、薄片和成像测井等资料来直接识别裂缝;此外,还可以利用常规测井、地震资料以及动态资料来间接识别裂缝。例如,由于裂缝的存在产生力学薄弱面和声阻抗界面的特征,以及裂缝对流体高渗透性和高电导通道的性质,它们在测井曲线上应该存在异常响应。根据裂缝在测井曲线上的响应特征,可以进行裂缝识别。常用来识别裂缝的常规测井主要是双侧向测井、微侧向测井、声波时差测井、地层倾角双井径曲线等。

在理论上,裂缝对电阻率响应相对而言更灵敏,在裂缝发育段,由于裂缝中饱含有流体,深、浅侧向电阻率相对于围岩降低。对高角度裂缝,深、浅侧向曲线形态平缓,深侧向电阻率大于浅侧向电阻率,深、浅电阻率呈“正差异”。在水平裂缝发育段,深、浅侧向曲线形态尖锐,深侧向电阻率小于浅侧向电阻率,深、浅电阻率呈较小的“负差异”。对于倾斜缝或网状裂缝,深、浅侧向曲线起伏较大,为中等值,深、浅电阻率近于相等。

此外,在声波时差曲线上,高角度裂缝变化较小,而低角度裂缝明显增大或周波跳跃;沿裂缝方向,井径扩大;中子孔隙度测井值增大,大于声波孔隙度测井值;出现地层密度值减低等响应特征。整体来看,裂缝通常在砂岩储层的常规测井曲线上的异常响应不是太明显,主要与砂岩储层基质的孔隙度和渗透率较大、裂缝所占比例较小有关。在碳酸盐岩储层、变质岩储层、火成岩储层和泥岩储层中,裂缝一般较发育,而基质的孔、渗性较小,裂缝在其中所占的比例较大,因而其测井响应明显。当基质的孔、渗性较大时,一般利用常规测井来识别裂缝的难度大,需要特别慎重。有关利用岩心、薄片、成像测井、常规测井、地震资料以及动态资料进行裂缝识别的内容将在后面的相关章节中详细介绍。

二、天然裂缝与人工裂缝的区别

储层裂缝研究的主要对象是其天然裂缝,在没有特别说明的情况,我们所说的裂缝都是指天然裂缝,它们是在地质历史时期中构造变形作用或物理成岩作用的产物。裂缝作为岩石中最容易形成的小型破裂构造,在钻井、取心和微观薄片的制作过程中都可以产生,在钻井、取心和微观薄片的制作过程中产生的这些裂缝称为人工裂缝。在储层裂缝描述过程中,需要对这些人工裂缝加以识别。只有区分哪些是天然裂缝,哪些是人工裂缝以后,在岩心和薄片描述及统计的裂缝结果才可信,才能反映储层裂缝的真实分布情况。

天然裂缝作为地质历史时期中形成的产物,通常具有以下特点:① 裂缝面上常见有石英、方解石、白云石等矿物充填;② 通常具有一个至多个平行的组系出现,且分布规则;③ 裂缝位于岩心内,不与岩心边缘相交;④ 在裂缝面上常见有擦痕甚至阶步等现象,其指示天然断裂作用过程中剪切和最大应力方向;⑤ 裂缝的方向性明显,延伸长,分布稳定,在岩心内部和边缘分布一致,与所处的岩心位置无关。

在钻井和取心过程中形成的人工裂缝一般具有下列特征(Kuland, 1990; 裴悻楠, 1996): ① 裂缝的形状很不规则或呈贝壳状,在细粒岩石中更是如此;② 在长距离内平行于某一划痕或定向沟,说明它们是在取心过程由于划刻造成的;③ 尽管层理倾角随深度变化,但裂缝面始

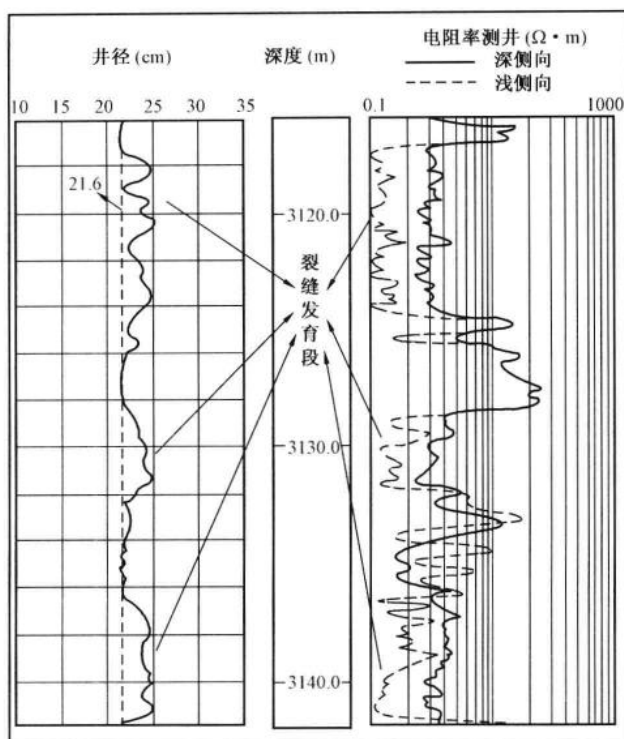


图 1-6 东部某低渗透砂岩油田井径与裂缝发育关系图

终平行于岩心的轴线,与层理的变化无任何关系;④在岩心切割后,由于上覆岩压卸载,容易形成与层面一致的诱导裂缝,或呈杯状,在岩心边缘,其走向或倾角发生改变;⑤呈环形,或在岩心边缘走向或倾角发生变化,主要为卸载裂缝;⑥呈螺旋形,在岩心的顶部常见,它们为岩心筒扭动所形成;⑦在岩心上还常见刀劈缝,具有明显的刀砍新鲜痕迹;⑧在岩心中心线部位,还常见钻头接触地层时,由于钻具重复加载形成的张性缝;⑨在岩心边缘还有呈羽毛状交替排列的花状缝,它们在岩心边缘呈弧形,在靠近岩心中心线部位变为沿岩心轴延伸,表现为似花瓣状,主要为岩心与钻头之间不稳定的摩擦形成。

在钻井过程中,由于钻具加载和钻井液柱压力作用,在井筒周围的井壁附近可以诱导产生大量垂直的水动力缝,通常造成微电阻率急剧下降而深、浅电阻率无变化,它们在井壁成像测井图上表现为沿井筒轴线的两条呈 180° 夹角的“铁轨”直线,这在测井裂缝识别和解释时需要特别注意。例如,在新疆小拐油田 FMI 测井图上,这种诱导垂直的水动力缝,垂向延伸几十米甚至上百米,通过与取心井进行系统对比发现,岩心上的裂缝只占 FMI 显示裂缝的 20% 左右,在 FMI 测井图显示的裂缝中,有相当一部分为上述人工诱导产生的水动力缝(袁士义等, 2004)。有关人工裂缝在成像测井上的特征将在裂缝的测井识别章节中介绍。

第三节 不同勘探开发阶段裂缝研究

在低渗透油气田的不同勘探和开发阶段,由于裂缝研究的目的和当时获取的资料程度不一样,因而储层裂缝的研究内容及手段也不尽相同。在裂缝性油气储层的勘探和开发中,可以划分为 4 个基本的阶段和裂缝评价类型(Nelson, 1985)。

一、勘探阶段

在早期的油气勘探阶段,其目的是希望能够发现和评价一个裂缝性油气藏。因此,这个阶段的裂缝研究主要是为了更好地确定一些储层地质参数,利用有限的地质资料,通过裂缝的识别和初步评价,确定油气藏的储层性质,预测裂缝的发育程度及裂缝的发育区,确定或预测有利勘探目标区,并部署钻探的井位。由于这一阶段的资料极为有限,没有获取专门针对裂缝的资料,所以这一阶段的裂缝评价和预测都是定性的。因此,利用区域或临近油田的裂缝资料,尤其是裂缝的成因及其主要控制因素方面的资料,来推断裂缝的类型、分布特征及发育程度就显得更为重要。

在早期勘探阶段,对裂缝成因及其控制因素的认识十分重要。如果是与褶皱有关的裂缝系统,则裂缝的发育范围广,在构造闭合区域的脆性岩石都有可能发育裂缝成为有利的储层,有巨大勘探的潜力。如果是与断层有关的裂缝系统,则裂缝的发育范围会小许多,裂缝发育程度的差异性也很大,在一些部位裂缝发育可以获得高产,而相距不远的部位,又有可能裂缝的发育极差而产量极低甚至是干井,如柴达木盆地狮子沟深层。在这类地区的勘探应该特别慎重,在进行勘探以前,进行构造的详细研究,尤其是断裂系统的研究更为重要。在褶皱或断裂构造不发育区,裂缝的分布可能主要受岩性的控制,这时了解储层岩性的展布就尤为重要。

在早期勘探阶段,最常用的地质资料包括:①构造形态的一般资料和二维地震资料;②地层层序和少数钻井的岩性剖面描述资料;③有关区域或临近油田的岩石力学性质资料;④少量的岩心常规物性分析资料;⑤少量几口井的常规测井资料;⑥少数几口井的钻探资料;⑦少数几口井的试油资料;⑧邻近油田或地表露头区的地质资料等。因此,在早期勘探