

裂缝预测与勘探

FRACTURE PREDICTION AND EXPLORATION

胡伟光 范春华 杨鸿飞 等编著



FRACTURE PREDICTION
AND EXPLORATION

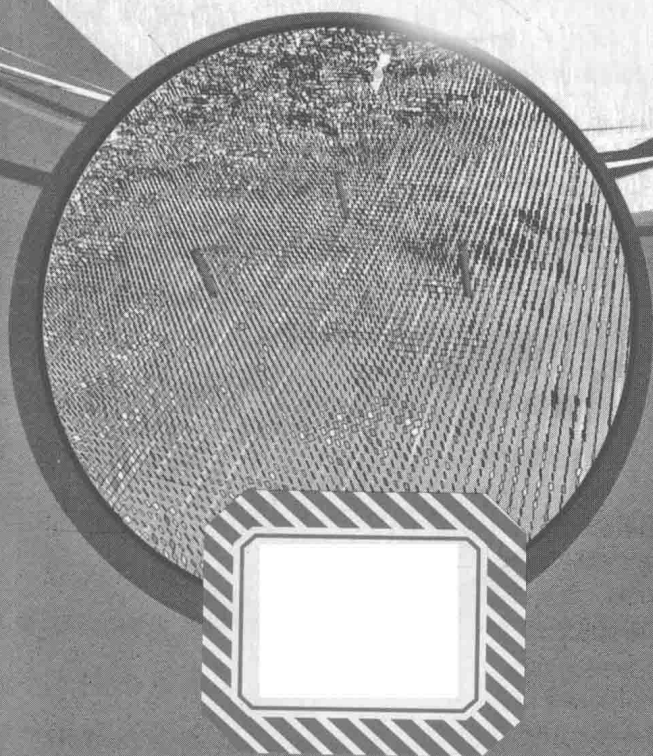
中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

裂缝预测与勘探

FRACTURE PREDICTION AND EXPLORATION

胡伟光 范春华 杨鸿飞 等编著



FRACTURE PREDICTION
AND EXPLORATION

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

内 容 提 要

本书以四川盆地海相碳酸盐岩及页岩、致密砂岩储层裂缝预测的勘探实例为基础,系统阐述了常规储层裂缝预测的原理及详细的技术方法、应用实例。针对四川盆地内飞仙关—长兴组礁滩相碳酸盐岩储层及五峰—龙马溪组页岩、陆相须二段致密砂岩储层的裂缝预测,基于叠前或叠后地震资料使用相关的裂缝预测技术方法分别进行计算,得到裂缝预测成果并进行分析、研究。本书总结了这些裂缝预测方法的应用情况及特点,提出裂缝预测的一些关键点;并提出勘探区内储层裂缝预测的相控三步法,利用该方法可实施勘探井井位布设。

本书以裂缝预测的理论与实践相结合,材料翔实,论述深入,不仅是对储层裂缝预测方面的分析,同时也系统地提供了裂缝预测的思路、方法和技术,具有很强的实用性。

本书可供从事碳酸盐岩及页岩、致密砂岩储层的勘探、开发、研究的人员参考,也可作为高等院校石油地质、地球物理、石油工程等相关专业的师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝预测与勘探 / 胡伟光, 范春华, 杨鸿飞等编著.

—北京: 中国石化出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-5114-3736-5

I. ①裂… II. ①胡… ②范… ③杨… III. ①裂隙储集层—油气藏—预测 ②裂隙储集层—油气勘探 IV. ①P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 286674 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 7.75 印张 166 千字

2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定价: 36.00 元

前言

目前国内外已发现不少裂缝油气藏，但如何从测井、地震资料识别裂缝储层并描述裂缝空间分布和定向，是石油工业界积极研发的技术方向。中国南方勘探区块所面临的相当大部分的油气储层均是裂缝型储层，该类型的油气藏不仅作为一种新的勘探领域为油田增储上产提供新的区块，还会对解决套管变形和水窜、注采井部署、油气藏建模等起到积极作用。同时鉴于裂缝在四川盆地碳酸盐岩储层、页岩储层及陆相砂岩储层中均相对发育，并且所起的作用相对重要，所以在四川盆地内进行针对储层裂缝的研究无论在勘探阶段或是在开发阶段都是必要的。

近年来，中国石化勘探分公司在四川盆地礁滩相碳酸盐岩及页岩储层、致密砂岩储层油气勘探中均取得工业突破，获得一大批高产工业气流井并荣获相关的油气勘探奖项。其中，礁滩型碳酸盐岩储层方面在普光、元坝、涪陵地区的飞仙关—长兴组地层中钻获一大批工业气流井，如 pg1 井及 yblc 井；页岩气则主要在川东南焦石坝地区的五峰—龙马溪组中获得突破，区内的 jy1HF 井经测试获 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流，从而在该区获得页岩气的商业突破，到 2015 年已布设近 200 口水平井用于页岩气的商业开发，现阶段则向焦石坝外围进行页岩气甩开勘探；在元坝陆相致密砂岩储层中也钻获一大批获得工业气流的钻井，如 yl11 井在须二段获得 $10.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流。

通过对这些获得工业气流井的岩心进行研究分析，发现一个共同点——储层裂缝相对发育，这些裂缝大多数处于无充填或半充填状态。探究其获高产工业气流的原因是储层中裂缝发育，可形成一定的裂缝体系，这些裂缝体系对孔隙型储层的沟通具有重要意义，形成新的天然气排出途径，所以寻找储层段中的裂缝发育部位，在油气勘探早期、开发阶段占有比较重要的地位，也是地球物理工作者的研究重点。

为了更好地指导及研究储层裂缝预测，应业内同行要求，我们总结了普

光、元坝、焦石坝这些取得商业发现的地区的飞仙关—长兴组礁滩相碳酸盐岩、五峰—龙马溪组页岩及须二段致密砂岩储层裂缝预测成果并进行分析研究，集成编著成书，探索、研究中国石化勘探分公司在这些地区油气勘探中的成功经验，期待为中国的油气储层裂缝预测、勘探实践提供一定的指导和借鉴作用。

本书共分为六章，第一章为与储层裂缝预测相关的国内外技术及礁滩相碳酸盐岩、页岩及致密砂岩储层裂缝的特点，有助于读者了解相关裂缝及其预测的技术特点。第二章至第五章重点阐述常规储层裂缝预测的原理及实践操作、应用实例，利用成熟的商业软件分别对有关地区的含油气储层段进行裂缝预测及成果展示。第六章是对礁滩相碳酸盐岩及页岩、致密砂岩储层裂缝预测的集成总结，结论可以给读者一些启示及思考。主要认识和成果简述如下。

1) 碳酸盐岩及页岩、致密砂岩储层的裂缝预测可以使用叠前或叠后地震资料作为输入，并确定裂缝预测方法及最佳参数来完成裂缝预测。

2) 各种裂缝预测技术具有各自的优、缺点，在大多数情况下使用单一裂缝预测技术难以对整个研究区的裂缝进行全覆盖。其中，叠前地震资料可预测小型—中型规模的裂缝，叠后地震资料则难以对该级别的裂缝进行预测，但对于大级别的宏观裂缝如断裂，使用叠后的相干技术则相对较好。

3) 针对裂缝方向的预测，以构造应力场分析技术所计算的裂缝方向与井上的实测裂缝方向误差较小，其他裂缝预测技术所得的预测结果与实测结果误差相对较大。

4) 要预测礁滩相碳酸盐岩储层裂缝中所含的不同流体，可利用 AVO 技术中的 $\lambda\rho$ 分析技术实施不同流体预测。

5) 针对储层裂缝预测的数据输入，叠前地震资料要优于叠后地震资料，因为叠前地震资料包含更多的信息，如方位角、振幅、频率等。

6) 提出利用相控三步法来预测储层裂缝发育的区域，并为勘探井井位布设提供依据。

7) 针对提高地震资料的信噪比及分辨率可以对采集及处理进行技术攻关，使其得到的地震数据更好地为裂缝预测服务。

8) 要采用裂缝综合预测手段，实施对研究区的裂缝预测，这样的预测结果更为准确、实用。

本书是中国石化参与四川盆地礁滩相碳酸盐岩及页岩、致密砂岩气勘探决策、评价研究和物探技术攻关的全体管理及技术人员集体智慧的结晶，从多年的储层裂缝预测研究成果中进行总结，在这项集体劳动成果集结出版的时候，笔者对上述参加人员表示衷心的感谢！也感谢为本书编撰辛勤付出的绘图人员。

本书在中国石化勘探分公司各级领导关怀下，由胡伟光、范春华、杨鸿飞等人共同撰写完成。本书编写的具体分工是：第一章由胡伟光、倪楷、李春燕执笔；第二章由胡伟光、范春华、吴蕾执笔；第三章由胡伟光、杨鸿飞、李发贵、肖伟执笔；第四章由胡伟光、范春华、王涛、李发贵、赵卓男执笔；第五章及第六章由胡伟光、范春华、吴蕾执笔。全书由胡伟光主编并统稿完成。

由于现阶段的油气勘探进程较快，相关的储层裂缝预测成果的分析、认识可能不足，并且本书成果集成总结的时间相对紧张，再加上作者水平有限，书中错误和分析不妥之处望读者不吝赐教。

目 录

1	储层裂缝研究概况	(1)
1.1	国内外裂缝预测研究概况	(1)
1.2	储层裂缝特征	(6)
1.2.1	碳酸盐岩储层裂缝特征	(7)
1.2.2	页岩储层裂缝特征	(10)
1.2.3	砂岩储层裂缝特征	(13)
2	基于叠后地震资料的裂缝预测	(17)
2.1	基于地震构造解释和沉积分析的裂缝预测	(17)
2.1.1	波形地震相分析原理	(17)
2.1.2	地震相分析实践	(18)
2.2	相干体技术	(22)
2.2.1	相干数据体计算实现方法	(24)
2.2.2	相干技术参数选择	(24)
2.2.3	相干体技术应用实践	(25)
2.3	曲率技术	(28)
2.3.1	曲率技术简介	(28)
2.3.2	曲率技术计算原理	(29)
2.3.3	曲率技术应用实践	(31)
2.4	吸收衰减分析法	(33)
2.4.1	吸收衰减的应用原理	(36)
2.4.2	吸收衰减分析法应用实践	(38)
2.5	颜色融合技术	(42)
2.6	地震属性分析法	(43)
2.6.1	伯格主频原理	(43)
2.6.2	伯格主频应用实践	(44)
3	基于叠前地震属性裂缝预测	(46)
3.1	AVO/FVO 技术	(46)
3.1.1	基本弹性参数	(47)

3.1.2	纵波与横波	(47)
3.1.3	速度、密度与波阻抗、孔隙度和弹性系数的关系	(48)
3.1.4	AVO 反演属性成果及油气物性含义	(49)
3.1.5	CMP 道集处理及叠前弹性波阻抗计算	(52)
3.2	AVO/FVO 技术应用实践	(54)
3.2.1	页岩叠前裂缝预测	(54)
3.2.2	碳酸盐岩叠前裂缝预测	(56)
3.2.3	砂岩叠前裂缝预测	(62)
4	方位地震 P 波属性裂缝预测	(64)
4.1	AVA(方位 AVO)分析法	(64)
4.2	VVA 分析法	(66)
4.3	IPVA 分析法	(67)
4.4	FVA 分析法	(67)
4.5	AVAZ 分析法	(68)
4.6	方位地震 P 波属性应用实践	(68)
4.6.1	碳酸盐岩裂缝	(68)
4.6.2	页岩储层裂缝	(76)
4.6.3	砂岩储层裂缝	(85)
5	构造应力场模拟	(91)
5.1	构造部位和构造应力	(92)
5.2	应力场分析技术	(92)
5.2.1	基本公式	(93)
5.2.2	地层曲率计算	(94)
5.2.3	裂缝参数计算	(95)
5.3	应力场分析应用实践	(95)
6	裂缝预测要点	(100)
7	结束语	(105)
	参考文献	(107)

1 储层裂缝研究概况

随着中国经济的快速增长,对能源的需求量越来越大,国内的油气产能已不能满足国民经济发展的需要,所以对石油天然气的勘探及开发显得相对迫切。四川盆地富含多套油气储层,主要的储层有飞仙关—长兴组礁滩储层^[1-3],以及五峰—龙马溪组页岩储层^[4-6]、陆相致密砂岩储层^[7-9],并且在这三套储层中均获得工业气流,取得商业发现,已经实现西气东输,满足东部大城市的用气要求。

四川盆内地层发育相对较全,沉积了自元古界至新生界共计 10 个层系的地层。自下而上分别为:上震旦统、寒武系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、第四系,进一步详细划分可分为 30 个组级地层单元。其中,上三叠统一第四系为陆相沉积,沉积岩岩性以砂岩、泥质岩为主(第四系未成岩)。中三叠统一上震旦统为海相沉积,沉积岩性以碳酸盐岩、泥页岩及砂岩为主。近年来四川盆地探区的针对海、陆相油气勘探的大量钻井资料证实,如果储层中存在裂缝,裂缝往往对储层具有沟通作用,可以提高钻井的油气产能。勘探实践表明在这三套储层中发育裂缝时,往往能使储层体系得到很好的连通,并利于后续的工业压裂。所以,对储层的裂缝进行预测,确定储层中的有利裂缝发育带,对油气勘探具有重要的意义。

1.1 国内外裂缝预测研究概况

裂缝总的来说包括裂隙、节理和断层三种类型,按发育规模来分可有小型(微观)、中型(宏观)、大型裂缝(宏观)。裂缝具有一定的延伸长度和宽度,裂缝之间可有一定的间隔距离。裂缝可以是敞开的,也可能是闭合的;裂缝中可充满流体,也可能被其他矿物所充填;裂缝可以是天然形成的,也可以是人工形成的。所以,裂缝在地层中的存在具有多种表现形式。

在漫长的地质年代过程中由于构造力及其他力的作用,地层中的坚硬岩石通常极易产生裂缝,裂缝生成的原因可分为以下两种:第一种是由构造及区域地质力形成的裂缝,地

壳运动使地层发生褶曲,从而形成很长的裂缝带,可以观察到延伸几十千米长的断层裂缝带,构造地质力除了会造成大型裂缝之外,还会造成大量的小型、中等规模的裂缝;第二种是受物理和化学作用形成的,在一定的温度和压力下,岩石自身脱水、收缩、干裂形成裂缝,这种裂缝多数是细小的微裂纹。从成因上来说裂缝主要存在四种类型的裂缝:即构造缝、层间页理缝、成岩收缩缝和异常压力缝。

从裂缝的几何形态来看,基本上有四种类型,即垂直裂缝(构成 HTI 介质)、水平裂缝(构成 VTI 介质)、倾斜裂缝(构成 TTI 介质)和网状裂缝(图 1-1)。根据岩心观察和测井解释发现大多数裂缝是垂直或近似垂直的裂缝,局部区域的井中岩心发现也有低角度的倾斜裂缝或水平裂缝、网状缝,如焦石坝地区页岩气井中的五峰—龙马溪组。

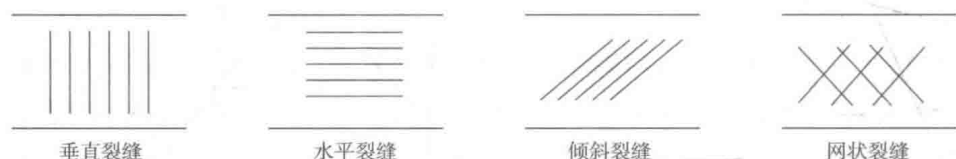


图 1-1 裂缝地质模型示意图

裂缝通常具有一定的宽度,小型规模的裂缝宽度是微米级的,裂缝的长度通常在几十到几百微米,中、大型裂缝的裂缝宽度是毫米级及以上的。裂缝的长度在几米到十几千米之间,大型裂缝可延长几十千米,中、小型裂缝相互交叉构成网状结构,网状结构也可延伸几米到几十千米。

一般情况下裂缝的间距是比较小的,大体是在几十厘米到几百厘米之间。裂缝的宽度小,间距就小;裂缝的宽度大,间距就大。裂缝的分布密度在不同的部位是不同的,在大多数情况下受挤压的核心构造部位(背斜或向斜)裂缝密度高达每米几十条,而在翼部可能每千米只有几十条。所以,在不同的构造部位上,裂缝发育的强度及产状可能有差异;其次,不同的岩性组合也可能比单一岩性在相同的构造应力作用下易产生裂缝。

研究资料表明裂缝不仅是储集空间,也是流体的渗流通道。裂缝储层是指天然存在的、对储层内流体的流动具有重要影响的储层。裂缝能为油、气从基质孔隙流到井眼提供通道,裂缝储层有孔隙度和渗透率,具有含油、气饱和度。通常只有互相连通的裂缝才是有用的,但被充填的裂缝也可能在人工压裂的作用下张开,也可能利于沟通储层。裂缝可以增加储集层的渗透性和孔隙度,也可以增加储集层渗透率的非均质性。所以,裂缝的分布密度、宽度,决定了储层的生产能力。

现阶段储层裂缝预测在大多数情况下主要使用地震资料及其相关的地球物理技术来进行,当然还有其他的技术手段,如地球化学勘探方法、构造物理模拟、地质分析法等。地震勘探技术尤其是三维地震、井中地震(如 3D-VSP 技术)、四维地震技术等有助于准确认识复杂构造、储层非均质性和裂缝发育带,三维地震资料解释技术能优化井位和井轨迹设计,以提高探井(或开发井)成功率。

运用地震波在裂缝介质中的传播理论,分析目的层系的地震波运动学、动力学响应特

征的变化,可以预测储层裂缝发育带的空间方位及分布密度,这已成为裂缝型储层横向预测的一项重要内容。根据地震波传播特性的不同,地震储层裂缝发育带预测有纵波方法(如叠后地震资料预测、叠前地震资料预测)、横波方法(如地震转换波预测、地震多波多分量资料预测)之分^[10]。

用地震方法进行裂缝检测的方法研究,先后经历了横波勘探、多波多分量勘探和纵波裂缝检测等几个发展阶段,形成了诸如横波地震勘探检测裂缝、转换横波探测裂缝、VSP(垂直地震剖面)法识别裂缝等技术。近几年来,在用纵波地震资料进行裂缝勘探方面取得了长足的进步,并开始由以前的定性描述向利用纵波资料定量计算裂缝发育的方位和密度方向发展^[11]。目前储层裂缝地震预测技术包括:①基于地震构造解释和沉积分析的裂缝预测;②叠后地震属性裂缝预测;③叠前地震属性裂缝预测;④方位地震P波属性裂缝预测;⑤多波多分量地震属性裂缝预测;⑥地震与测井综合裂缝预测;⑦构造正反演裂缝预测;⑧构造应力场模拟裂缝预测;⑨地震波分形分析裂缝预测。

(1) 基于地震构造解释和沉积分析的裂缝预测

这是一种基于成因分析的预测方法,它可将裂缝预测转化为构造研究、沉积相分析、岩石物性分析、储层厚度预测等,从而间接预测裂缝发育规律。

该方法根据钻井、录井、测井等资料识别出目标岩层段,通过目标岩层段顶、底界面地震层位的标定和拾取,得到构造图和厚度分布图;利用地震属性分析或地震波形聚类等技术进行地震相分析和沉积相分析。沉积相就是沉积环境及在该环境中形成的沉积岩(物)特征的综合,地质上划分沉积相是根据沉积物的物理、生物和化学等特征。根据地震相分析划分地震相,主要根据地震子波波形的变化,将该区目的层的地震波形进行相干分类,再与已知钻井资料进行对比,然后赋予地震属性分类图以合理的地质意义^[12]。

(2) 叠后地震属性裂缝预测

从地震数据中派生的多种多样的地震属性(Chopra, 2005),便于地质构造、地层、岩石/流体特性等解释。例如能量、同相轴、频率(优势频率、平均频率、平均平方频率)、最大谱振幅、超过优势频率的谱面积、吸收品质因子、频率斜坡下降、频率滤波、瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率、振幅一阶导数、振幅二阶导数、余弦相位、包络加权相位、包络加权频率、相位加速度、薄层指示、带宽、Q因子、缩放比例、相干性(相似性)、谱分解(FFT、CWT)、三维滤波(低通、拉普拉斯、Prewitt、速度滤波器)、曲率、振幅梯度等。储层中裂缝的存在造成了多种地震属性的变化,测量这些地震属性的变化可以进行裂缝预测。常用的叠后地震属性裂缝预测方法包括:①相干分析法^[13,14];②方差分析法^[15];③边缘检测分析法^[16~21];④传统地震属性分析法^[22~24];⑤沿层构造属性分析法^[25];⑥地震曲率分析法^[26];⑦分频数据分析法^[27,28];⑧吸收系数分析法^[29];⑨层间地震信息差异分析法^[30];⑩地震预测压力分析法^[31]。

(3) 叠前地震属性裂缝预测

叠前地震属性是在叠前地震道集(或角道集)数据的基础上,经过地震反演(包括 AVO

反演、叠前弹性波阻抗反演)处理得到的有关地震波的运动学、动力学和统计学特征以及几何特征信息^[32]。叠前地震属性包括:纵波速度、横波速度、纵横波速度比、密度、振幅随炮检距(或入射角)变化量、纵波阻抗、横波阻抗、弹性波阻抗、截距、梯度、烃类指示因子、流体因子、泥质百分含量、孔隙率、泊松比、拉梅系数、体积模量、剪切模量以及一些复合参数等。地层中裂缝的存在会造成一些叠前地震属性的变化,利用这些对裂缝敏感的叠前地震属性可以预测出地层中的储层裂缝发育带及其含油气性。常用的叠前地震属性裂缝预测方法有:①AVO分析法^[24];②AVA分析法^[31];③FVO分析法^[13]。

(4) 方位地震 P 波属性裂缝预测

方位地震 P 波属性裂缝预测又称为纵波方位各向异性裂缝检测^[33]。如果岩石介质中的各向异性是由一组定向垂直的裂缝引起的,根据地震波的传播理论,当 P 波在各向异性介质中平行或垂直裂缝方向传播时具有不同的旅行速度,从而导致 P 波地震属性随方位角的变化,分析这些方位地震属性的变化(如振幅随方位角变化、振幅随炮检距和方位角变化、速度随方位角变化、传播时间随方位角变化、频率随方位角变化、波阻抗随方位角变化等),可以预测针对中、小型规模的裂缝发育带的分布以及裂缝(特别是垂直缝或高角度缝)发育的走向与密度。较基于常规叠后地震资料的裂缝检测精度更高,其检测结果与裂缝发育带的微观特征有更加密切的关系。目前方位地震 P 波属性裂缝预测方法主要有:①AVO/AVA分析法;②VVA 分析法;③IPVA 分析法;④FVA 分析法;⑤AVAZ(方位 AVO)分析法。

(5) 多波多分量地震属性裂缝预测

横波在穿过裂缝性各向异性介质时,通常会分裂为两个波。一个平行于裂缝方向,速度较快,称为快波(S1);另一个速度较慢,垂直于裂缝方向,称为慢波(S2),这就是所谓的横波双折射现象。快慢波的方向反映了裂缝的走向,快慢波的时差反映了裂缝的密度,时差越大,则密度越大。在时间域,由于快慢波传播速度的差异,在水平分量上记录到快慢波时间差。常用的多波多分量地震属性裂缝预测方法有:①快慢波旅行时差预测法;②快慢波的振幅差异预测法。横波对各向异性的响应比纵波敏感,所以横波资料更有利于预测裂缝参数^[34,35]。

(6) 地震与测井综合裂缝预测

由于地震资料具有空间上数据点多、分布均匀的特点,利用地震方法进行裂缝预测,可以在区域上了解裂缝发育的空间分布,但由于各种地震属性对裂缝响应均存在一定的多解性,因此预测精度受到限制,不能精细地描述出裂缝发育情况。而测井曲线在纵向上有很高的分辨率,可分辨出 0.5m 左右的层段,而且往往对裂缝发育段有较明显的响应特点,其中常用的测井识别评价裂缝的方法有:微电阻率成像测井(FMI)、微电阻率扫描测井(FMS)、声波成像测井(UBI)、纵横波裂缝声波识别测井(DTCS)、电磁波裂缝识别测井(EPT)、微电导异常识别测井(SHDT)、倾角测井资料裂缝识别(DCA)等。这些方法和设备能测量出储层裂缝的倾角、走向、宽度、长度、视孔隙度,以及裂缝的充填与开启程

度,甚至能识别出微裂缝及亚微观裂缝。但是由于井点分布和密度的影响,对于裂缝在空间分布的预测受到了限制。因此,近年来强调充分利用测井资料和地震资料的各自优势,利用测井曲线上识别出裂缝发育的位置进而结合地震数据来达到在剖面上和区域上更好预测裂缝发育带的目的。目前在地震与测井综合裂缝预测中使用的方法有:①泥岩裂缝储层特征参数提取和储层特征反演法^[36];②BP神经网络法^[37];③基于GA-BP理论的储层视裂缝密度地震非线性反演法^[38]。

(7) 构造正反演裂缝预测

构造裂缝与大地构造运动以及岩石变形过程密切相关,从分析简单褶皱的力学模式入手,通过对地层的构造发育历史进行反演和正演来计算每期构造运动对地层产生的应变量,从而计算可能裂缝发育带,在国内外许多地区的实际应用中取得了很好的效果。近些年发展了一系列先进的运动学和非运动学构造恢复方法,使之能应用于逆冲褶皱带、扩张带,并能解决反转、盐丘和走滑等复杂构造。该项技术的构造恢复和正演采用较先进的算法,能够适用于逆冲褶皱带、扩张构造带,并能解决反转构造和走滑构造的恢复。

(8) 构造应力场模拟

地壳岩体的变形和裂缝系统的形成常常受到构造运动及其作用强度的影响,裂隙的产生同构造应力场分布密切相关。构造应力场数值模拟技术是数学力学手段的一种模拟方法,利用这种模拟技术,计算了研究区内主应力和剪切应力的分布,预测出研究区内裂隙发育带的宏观平面分布。

(9) 地震波分形分维分析

裂缝是在应力作用下岩石未发生明显位移的破裂。自然界分布最为广泛的是构造裂缝,其走向、分布和形态都受局部构造应力作用方式所控制。断层与裂缝都是地应力作用的结果,是地层受力的反映。前人研究表明,天然裂缝系统是一个分形体系。该方法借助地震分辨断裂的分布特征,再根据其自相似性(因为断裂和裂缝往往存在伴生关系并且具有一定的空间分布范围),预测地震分辨率以内的断层和裂隙分布。把分形分维技术^[39]引入到利用地震资料预测裂缝中是裂缝预测方法上的一种尝试。通过分形分维反映裂缝与断层的内在联系,对裂缝分布规律可作半定量的预测,将它与对裂缝地震波特征异常的分析相结合,应用效果更好。

在常规的油气勘探中,地震勘探往往要考虑很多因素,如经济性、构造解释、储层预测等需要。一些裂缝预测方法如多波多分量方法在油气勘探中不太适用,主要是其经济上投入巨大,费效比高,造成不能有效的推广;相比较纵波资料的取得相对经济、便宜,并且可以快速应用到构造解释、反演等各个方面。所以,现在较为常用的是使用叠前或叠后地震纵波资料实施裂缝预测,并由此催生出一大批与之配套的商业化的裂缝预测技术。在实际裂缝预测中主要使用现阶段成熟的裂缝预测技术来进行礁滩相碳酸盐岩及页岩、致密砂岩储层段的裂缝预测,这些裂缝预测技术大多数被广泛地应用到各个油气田的储层裂缝预测,并取得相对较好的预测效果。

1.2 储层裂缝特征

四川盆地及周边造山带经历了多期复杂的构造叠加与改造,现今地表构造分布的一个显著特点是周缘造山带围绕四川地块的边缘分布。盆地边缘的造山带经历了印支期板块俯冲、碰撞造山和燕山—喜山期陆内造山两次大的造山过程。

这两次造山作用在盆地边缘乃至盆地内部,形成一系列大小不一、规模不等的褶皱。这些褶皱长一般在几千米到几十千米,少数可达几百千米。在褶皱内常伴生纵向逆断层,褶皱翼部的层面上常具有与逆断层面上擦痕相似的层间滑脱面擦痕,层间小褶皱的轴面均倒向褶皱的主轴面,说明这些褶皱均受水平挤压而形成纵弯褶皱。通过不整合面、不同方向构造的交切复合关系等分析,筛分出三期构造,即印支期、燕山期、喜山期构造,从而为恢复四川盆地应力场提供了可能和基础。

这些造山运动及应力场的分布形态对盆地内的储层裂缝的形成影响巨大,并可能造成储层内裂缝发育的强弱变化。如离盆缘较近的普光及礁石坝地区则断裂相对发育,断层延伸相对较远,而由此所伴生的中、小型裂缝也发育;而离盆缘相对较远的元坝地区,则在陆相须家河组地层中发育高陡断裂带,但断裂带往往延伸不远,而其海相的长兴组地层中断裂则不发育或没有断层。

(1) 印支期构造应力场

印支期区域构造应力场受盆地边缘造山带的控制,呈现四周向盆地的挤压应力状态。西北侧龙门山一带,由于松潘—甘孜海槽关闭,造成龙门山自北西向南东的逆冲推覆。应力场方向为北西—南东向,主压应力方向为自北西向南东挤压。北侧米仓山,秦岭勉略小洋盆俯冲关闭,秦岭褶皱隆升,产生自北向南的挤压应力场,主应力方向由北向南的挤压。北东侧大巴山,秦岭板块与扬子板块的俯冲、碰撞,使北大巴山褶皱隆升,逆冲推覆,形成北西向褶皱、冲断带,应力场方向为北东—南西向,主压应力是自北东向南西的挤压。川东南主要受到雪峰山造山带隆起的影响,产生南东—北西向应力场,主压应力主要为自南东向北西挤压。印支运动的中、晚期,秦岭造山带东西向右行剪切造山。

在上述边缘造山带区域应力场的背景上,川东北盆地内部应力场状态围绕周缘造山带大体可以三分:①川东达县—万县一带,位于雪峰山逆冲推覆构造的前缘,形成呈北东向分布的滑覆褶皱与断裂构造,局部应力场主要为北西—南东向挤压。②大巴山前缘的通、南、巴一带,由于印支期北大巴山的逆冲推覆,在其推覆前缘地带产生滑覆构造,形成一系列以奥陶系厚层灰岩为底板,以志留系页岩为主滑脱层的滑脱褶皱、断裂构造。褶皱的主方向为北西向,卷入地层主要为志留系—三叠系,其指示的局部应力方向为北东—南西向,主要是自北东向南西的挤压。③米仓山一带,受南北向区域应力场影响,形成近东西向短轴背向斜构造,主要应力为近南北向挤压。

(2) 晚燕山—早喜山期构造应力场

燕山晚期,发生陆内造山作用阶段。此期,区域构造应力场具有继承性,仍是从盆地周缘造山带向盆内的挤压作用,包括米仓山在内的汉中地块向北挤入秦岭造山带,产生南北向挤压应力,致使米仓山进一步隆升。南秦岭此时再次右行剪切褶皱和上升。大巴山一带遭受自北东向南西的挤压,在西有米仓山—望江山穹隆向北的挤入、东有黄陵地块的阻挡情况下,沿盖层多层滑脱而发生了逆冲推覆作用,形成向西南突出的弧形构造。川东则主要以北西—南东向应力场为主,在南东向挤压应力作用下,盖层发生多层次滑脱,形成向北西突出的弧形构造。

喜山早期,应力场与前两期相比,发生了较大变化,主要以北西—南东向区域挤压应力场为主。在这种应力场背景下,四川盆地形成一系列北东向宽缓褶皱。在此期间,大巴山构造不再活动,主要是受到北东向构造的改造。米仓山构造东端横跨在大巴山近南北向推覆构造上,致使大巴山南北向构造得到抬升。米仓山隆起南缘扬起端叠加在大巴山推覆前缘北西向变形带上,导致从扬起端向向斜核部方向、北西褶皱带侏罗系分布范围由小变大、由短轴背向斜向线形褶皱的变化。

(3) 喜山晚期构造应力场

喜山晚期是川东北构造的最终定型期。此期的区域应力场分布与喜山早期相反,主要为北东—南西向,但其应力大小及分布范围较之早期要小得多。盆地周缘造山带的龙门山、川东褶皱带等构造活动不明显,仅大巴山构造表现出强烈活动。它继续发生向盆地的仰冲作用,并叠加在印支、燕山期所形成的弧形构造带上,使之得到增强。该期应力场的范围仅限于与大巴山弧形构造带及与之紧密相邻的盆地边缘,如通、南、巴地区和达县—宣汉地区。在这些地区,由于北东—南西向挤压应力场的作用,形成一系列叠加在早期北东向构造之上的、并对其进行改造的、北西走向的褶皱与断裂。

1.2.1 碳酸盐岩储层裂缝特征

根据四川盆地川东北的飞仙关—长兴组礁滩相碳酸盐岩储集空间类型划分^[40,41],可以划分为滩、礁类、碳酸盐岩孔洞类、碳酸盐岩裂缝类以及孔洞、裂缝混合类四种类型。其中,飞仙关组鲕粒灰岩储层由于沉积特征所决定,此类储集岩呈大小不一、厚度不一的凸透镜状展布。岩性主要为鲕粒灰岩、砂、砾屑灰岩、亮晶灰岩和白云化鲕粒灰岩,孔隙度低(1%~2%)、渗透性差($10^{-4} \sim 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。地震剖面中往往表现为强振幅反射,具有局部“亮点”特征,飞仙关滩相储层体内部的地震反射普遍为强、弱振幅反射混杂状(图1-2)。例如渡口河气田,孔渗条件较好,可能与储层的白云化程度有关。由于孔渗条件差,所以需要有裂缝相配合才能形成较高产能。普光地区的飞仙关组下段由于孔隙、裂缝相对发育^[42~48](图1-3),所以钻遇该层段的钻井大多数获得工业气流。

总的来说四川盆地长兴组礁体^[49~53]碳酸盐岩储层孔隙度较高,平均为8%,渗透率为 $0.71 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,礁体中白云岩孔渗条件明显好于灰岩。储层孔隙以晶间孔、晶间溶孔及

非组构控制的溶孔、溶洞为主，构造缝与溶缝起到沟通孔隙的作用，因此，也属于裂缝 + 孔隙型储层。川东北地区礁体在地震剖面上的表现为长兴组反射加厚呈丘状、杂乱反射状并伴有“亮点”型(图 1-4)。在黄龙背斜和铁山背斜高点中，均获得这类生物礁块气藏并钻获工业气流。

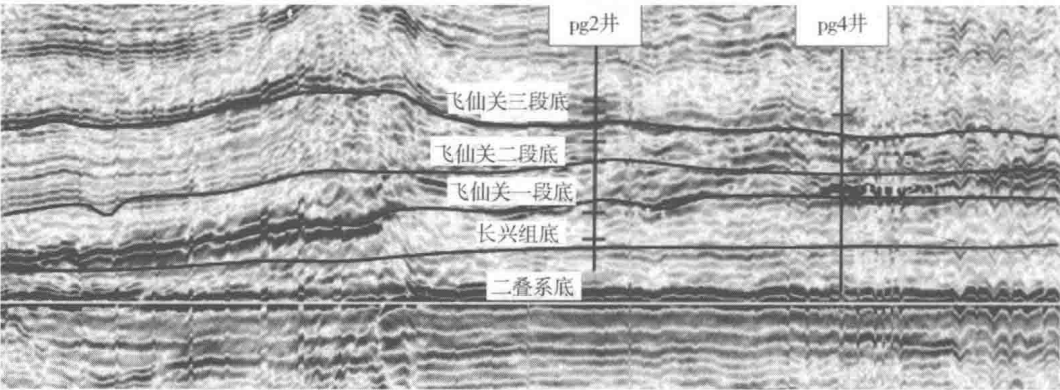


图 1-2 普光地区 pg2 井和 pg4 井的 TP2 层拉平连井剖面示意图



图 1-3 普光地区 pg1 井飞仙关组下部发育高角度裂缝的岩心

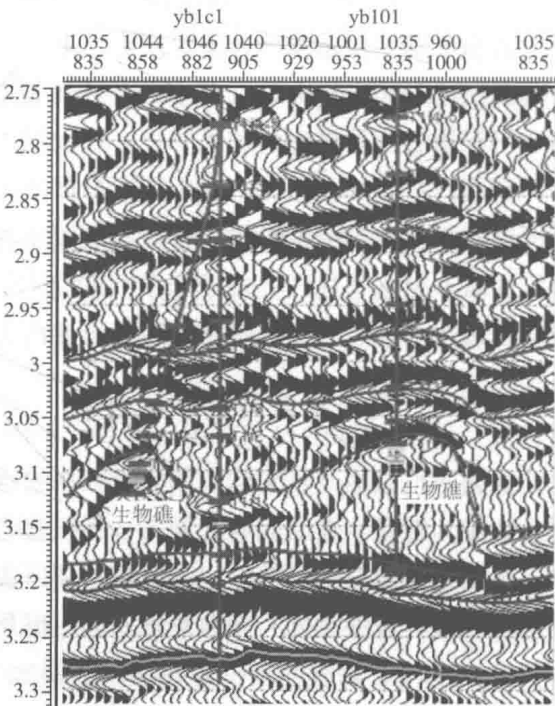


图 1-4 元坝地区一般 yb1c1 井和 yb101 井连井剖面示意图

通过对四川盆地元坝地区多口井中的长兴组全井段成像测井、岩心、薄片等大量资料的仔细观察发现，长兴组礁滩碳酸盐岩储层裂缝及溶蚀孔、洞主要发育于长二段储层，长一段次之，且长二段主要发育构造缝(垂直缝、斜交缝尤为发育，水平缝次之)、压溶缝及

