

新世纪学术丛书·地球与环境科学类

NIYAN LIEFENG YUCE LILUN YU SHIJIAN

泥岩裂缝预测 理论与实践

◎ 刘成斋 著

● 中国科学技术大学出版社 ●



8.130.

L590

新世纪学术丛书·地球与环境科学类

泥岩裂缝预测理论与实践

刘成斋 著

中国科学技术大学出版社
合 肥

内 容 简 介

本书从裂缝介质的波动方程出发,系统地研究了裂缝预测理论(地震波传播规律和 P-S 转换波、P 波特征)和方法(纵波预测裂缝法、方位反演裂缝法),并以胜利油田罗家地区为例,以钻井资料和全方位三维地震数据为出发点,综合运用石油地质学、构造地质学、沉积学、地球物理学理论和方法,探索了泥岩裂缝的地质、地震、测井综合预测和识别方法。

本书是中国石油化工集团公司“十五”重点攻关课题——“全三维地震勘探技术”的重点成果之一,其研究内容填补了国内泥岩裂缝油气藏勘探方法与技术的空白。

本书可供从事裂缝油气藏勘探开发的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

泥岩裂缝预测理论与实践/刘成斋著. —合肥:中国科学技术大学出版社. 2003.6
(新世纪学术丛书·地球与环境科学类)

ISBN 7-312-01639-1

I. 泥… II. 刘… III. 泥岩—裂缝油气藏—预测 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 089082 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:9.75 字数:228 千

2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-312-01639-1/Q·41 定价:20.00 元

献 给

为石油勘探与开发而辛勤工作的科技工作者和同行朋友，愿本书为促进我国泥岩裂缝理论研究和科技进步发挥积极作用！

——
作者

前 言

泥岩裂缝油气藏是指在泥岩、页岩等岩石组合中，以裂缝为主要油气储集空间形成的特殊油气藏。20 世纪初以来，泥岩裂缝油藏在国内外都不断地有大量的发现。在国外，美国的东、西部及南部的墨西哥湾诸盆地；前苏联西西伯利亚盆地等已有大量的发现，例如，美国找到了 100 多个硅质页岩裂缝性油田，1919 年发现的艾克希尔斯页岩油藏，储量达 7 255 万吨；年产油 81 万吨；前苏联的萨伊姆矿床在泥岩中已产出 1 000 万吨石油。在国内，我国的江汉、渤海湾、松辽、四川及西部的柴达木盆地也有发现，在胜利油田济阳坳陷已有数百口井在泥岩地层中获得良好的油气显示，数十口井获得工业油流，例如，罗 19 井、罗 20 井、罗 42 井、罗 48 井、新郭 3 井、大 93 井等，其中，代表性钻井有义 18 井、永 54 井、新郭 3 井、罗 42 井等，测试日产原油可达 91.3 吨，单井累产油可达到 13 605 吨。这说明随着勘探技术的不断进步，泥质岩裂缝油气藏已成为油田勘探的新领域，具有较大的勘探潜力，而裂缝的分布和特征预测成为该类油气藏勘探开发的关键因素。

众所周知，泥岩裂缝由于其孔隙较窄，岩石物性参数变化不灵敏，勘探难度较大，直到 20 世纪 70 年代，国外才有专著发表，而我国对于裂缝性油气藏的研究则是从 20 世纪 80 年代开始才有所进展，到目前为止，尚没有一套系统而又完整的裂缝性油气藏的勘探与预测理论和方法，因此，开展泥岩裂缝性油气藏综合勘探方法研究，不仅是胜利油田战略资源接替的需求，而且也是国内外关于裂缝性油气藏勘探技术发展的需要。因此，胜利油田以中国石油化工集团公司“十五”重点攻关项目“全三维地震勘探技术”为基础，从裂缝介质的波动方程出发，系统地研究了裂缝预测理论和方法，并以胜利油田罗家地区为例，综合运用石油地质学、构造地质学、沉积学、地球物理学理论和方法，探索了泥岩裂缝的地质、地震、测井综合预测和识别方法。

本书是以作者参加的上述研究所取得的成果为基础,经过系统总结、提升,并几经修撰而成,是众多学者和工作在石油勘探科研、生产第一线的科技工作者共同的劳动成果。其中,参与裂缝介质波动理论与泥岩裂缝预测方法研究工作的同志还有:胜利油田博士后工作站李琦博士和成都理大学的贺振华教授、杨绍国教授、黄德济教授等;参与山东罗家油田泥岩裂缝油气藏勘探实践的同志还有:曲寿利教授、宋国奇教授、王新红博士、何一中博士、桂志先博士,王成礼博士、冷传波博士、季玉新硕士、胡立新、康仁华等同志,全书由刘成斋总撰。

本书的撰写得到了胜利油田有限公司副总经理李丕龙、副总地质师张善文、高级工程师杨永生、物探研究院院长韩文功、物探公司经理宋玉龙等领导同志的关心、支持和帮助,在此向关心、支持和参加该项工作的各位领导、老师、同事和朋友一并表示衷心的感谢!并向被本书引用文献和图件的版权所有者表示诚挚的谢意!

裂缝预测是一个世界级的难题,本项研究虽然在这一领域里做了一些工作,但是还有许多更深层次的问题有待于今后继续研究,另一方面,由于作者的水平有限,对一些问题的研究不够深入,因此,书中所及内容也可能存在疏漏,甚至是认识上的偏差或错误,敬请有关专家斧正赐教。

刘成斋

2003年6月18日

目 次

前言	(1)
第1章 绪论	(1)
1.1 泥岩裂缝油气藏在油气领域的地位	(1)
1.1.1 国内外泥岩裂缝油气藏分布	(1)
1.1.2 胜利油田泥岩裂缝分布与勘探前景	(5)
1.2 裂缝预测方法研究的现状	(6)
1.2.1 利用地震速度预测裂缝性油气藏	(8)
1.2.2 横波地震勘探检测裂缝	(9)
1.2.3 VSP(垂直地震剖面)法识别裂缝	(12)
1.2.4 地震属性参数方法	(13)
1.2.5 三维相干技术识别断裂及裂缝系统	(13)
1.3 课题研究意义与技术路线	(15)
1.3.1 课题意义	(15)
1.3.2 技术路线	(16)

第一篇 裂缝介质波动理论与泥岩裂缝预测方法

第2章 EDA 介质波动理论	(21)
2.1 裂缝介质模型	(21)
2.1.1 裂缝介质与各向异性之间的内在联系	(21)
2.1.2 裂缝形状及模型	(22)
2.2 裂缝介质波动理论基础	(22)
2.2.1 聚合体弹性参数近似解	(23)
2.2.2 Hudson 裂缝理论	(25)

2.2.3	Thomsen 裂缝理论	(27)
2.3	EDA 介质地震波传播规律	(27)
2.3.1	各向异性介质本构方程	(27)
2.3.2	EDA 介质有效弹性模量	(30)
2.3.3	EDA 介质地震波相速度	(32)
2.3.4	数值分析	(33)
第 3 章	EDA 介质地震波场特征	(36)
3.1	EDA 介质弹性波动方程	(36)
3.2	P-S 转换波特征	(39)
3.2.1	波动方程与差分方程	(40)
3.2.2	数值模拟与分析	(41)
3.3	P 波特征	(45)
3.3.1	波动方程与差分方程	(45)
3.3.2	地质模型	(46)
3.3.3	模型的地震响应	(46)
3.4	波速度、衰减与裂缝参数的关系	(53)
3.4.1	裂缝密度对地震波速度、衰减的影响	(53)
3.4.2	裂缝方位对地震波速度、衰减的影响	(56)
第 4 章	泥岩裂缝预测方法	(59)
4.1	纵波预测裂缝法 (AVA 法)	(60)
4.2	方位反演裂缝法 (IPVA 法)	(67)

第二篇 山东罗家油田泥岩裂缝油气藏勘探实践

第 5 章	地质背景	(73)
5.1	区域地质特征	(73)
5.1.1	区域构造位置	(73)

5.1.2 地层	(75)
5.1.3 构造	(77)
5.1.4 石油地质基本特征	(83)
5.2 罗家地区地质特征	(85)
5.2.1 构造背景	(85)
5.2.2 构造演化史	(87)
5.2.3 地层发育特征及湖盆演化	(89)
第6章 泥岩裂缝特征	(91)
6.1 泥岩裂缝分类描述	(91)
6.1.1 构造裂缝	(92)
6.1.2 成岩裂缝	(93)
6.1.3 异常压力裂缝	(93)
6.1.4 变质收缩裂缝	(94)
6.2 泥岩物性特征	(94)
6.3 泥岩裂缝综合特征	(96)
6.3.1 测井特征	(96)
6.3.2 地震反射特征	(102)
6.3.3 泥岩裂缝与碳酸盐岩裂缝的异同	(105)
6.4 泥岩裂缝油气藏特征	(105)
6.4.1 生油岩特征	(105)
6.4.2 储层分析	(106)
6.4.3 盖层分布	(106)
6.4.4 泥岩裂缝含油气系统特征	(106)
6.5 泥岩裂缝油气藏综合地质模型	(107)
6.5.1 地质格架模型	(107)
6.5.2 构造模型	(109)
6.5.3 沉积模型	(109)
6.5.4 成岩模型	(111)

6.5.5 异常压力模型·····	(114)
6.5.6 流体地化模型·····	(114)
第7章 泥岩裂缝的预测与效果分析的获取·····	(116)
7.1 关键性资料——P波数据采集·····	(116)
7.2 地震数据的重要处理技术·····	(118)
7.2.1 高保真处理技术·····	(118)
7.2.2 高信噪比处理技术·····	(120)
7.2.3 高精度静校正处理·····	(122)
7.2.4 速度分析及速度场的建立·····	(122)
7.3 裂缝参数提取的预处理·····	(125)
7.3.1 方位道集的形成·····	(125)
7.3.2 多方位角地震反演·····	(125)
7.4 裂缝预测与效果分析·····	(132)
第8章 问题与探讨·····	(137)
参考文献·····	(138)

第1章 绪 论

1.1 泥岩裂缝油气藏在油气领域的地位

目前我国大部分油田已进入中后期开采阶段,用于勘探开发的砂岩等常规油气藏逐渐减少,泥质岩类油气藏作为重要的隐蔽油气藏越来越受到重视,其中泥岩裂缝油气藏是一个发现较早、综合研究程度较低的特殊油气藏类型。

欧美国家对于泥岩裂缝油气藏的研究起步较早,国内的大庆、胜利等主要油田也先后发现了具有工业价值的泥岩裂缝油气藏。随着油田勘探程度的不断提高,泥岩裂缝油气藏将逐渐成为今后油气勘探的重要领域和后备阵地。

1.1.1 国内外泥岩裂缝油气藏分布

泥岩裂缝油气藏是指以泥质岩类为基质,泥质岩中发育的裂缝和孔隙为主要储集空间和渗滤通道的特殊储集层(戴启德等,1996,赵澄林,1999)。目前在美国、前苏联、中国、加拿大、阿根廷等地均发现并开采泥岩裂缝油气藏(见表1-1)。

美国主要的含油气盆地大都有泥岩油气藏发现(见图1-1)。截至1999年Appalachian, Michigan, Illinois, Fort Worth 和 San Juan 五个盆地共有28 000多口泥岩裂缝性天然气井钻探,产出近 $1.075\ 4\times 10^{10}\text{m}^3$ 天然气(GRI, 2001)。美国泥岩天然气藏的产量从1989年的 $4.2\times 10^9\text{m}^3$ 增长到1999年的 $1.075\ 4\times 10^{10}\text{m}^3$,增长了约2.5倍。

这个增长主要来自于对新区泥岩油气藏勘探研究加大力度, 和大规模商业开发的投入。针对泥岩油气藏的地质特征, 稳定 Ohio 页岩储集层油气产量的同时, 陆续开展对 Antrim, Levis, Barnett, New Albany 等油气储集层的开发, 目前这 5 个泥岩裂缝气藏发育层系已成为美国主要油气资源阵地 (见图 1-2)。

表 1-1 世界部分泥岩裂缝油气藏统计表 (李琦, 2000)

地区	储层岩性	地层	地质特征	物性资料	备注
(美国) 加利福尼亚湾	页岩、燧石层 灰泥岩、白云岩	中新统 蒙特雷组	单井油流: $954\text{m}^3/\text{d}$ 可采储量: $5.0\times 10^7\text{m}^3\sim 8.0\times 10^7\text{m}^3$ 地质储量: $3.5\times 10^8\text{m}^3\sim 4\times 10^8\text{m}^3$	裂缝渗透率: $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2\sim 3\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 基质渗透率: $1.0\times 10^2\mu\text{m}^2$	背斜, 伴生气
(美国) 阿巴拉契盆地	灰色、灰绿色和黑色页岩	泥盆系 页岩	天然气可采储量: $2.4\times 10^{13}\text{m}^3\sim 3.1\times 10^{13}\text{m}^3$ 地质储量: $0.7\times 10^{11}\text{m}^3\sim 2.2\times 10^{12}\text{m}^3$	孔隙度: 4% 基质渗透率: $1.5\times 10^2\mu\text{m}^2$	
(美国) 威利斯顿盆地	灰色、灰褐色和黑色页岩	巴肯组 页岩	深水缺氧环境的生油岩	有机质含量: 7%~13%	鼻状 构造
(前苏联) 萨雷姆油田	黑褐色、黑色硅化沥青质泥岩	侏罗系 巴热诺夫组泥岩	埋深: $2700\text{m}\sim 3000\text{m}$ 异常高温高压 压力系数: 1.45~1.6	总孔隙度: 5.8%~8% 裂缝-孔隙型	透镜 体状 油藏
(英国) 北海	页岩	莫里页岩	生油岩中	裂缝-孔隙型	
(加拿大) 魁北克低地	黑色页岩		天然气	裂缝-孔隙型	
(阿根廷) 圣埃伦油田	泥页岩		油气	裂缝	
(厄瓜多尔) 圣埃利纳	泥页岩		生油岩中		
(中国) 东部和西部	泥质岩	白垩系 和下第三系	生油岩中	裂缝 裂缝-孔隙型	



图 1-1 美国主要泥岩裂缝油气藏的分布情况 (GRI, 2000)

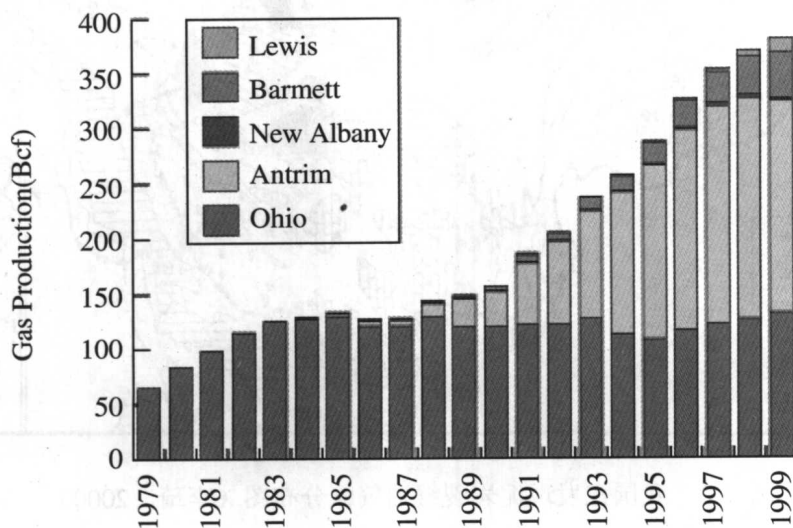


图 1-2 美国泥岩裂缝天然气产量统计 (GRI, 2000)

我国东部松辽、渤海湾、南襄、江汉、苏北等裂谷型盆地和西部柴达木、酒西、吐哈、柴达木等前陆挤压型盆地都广泛发育厚层生油泥质岩,在这些生油泥岩中,大部分都已勘探到具有工业价值的泥质岩类油藏,反映出我国泥质岩类油气藏勘探的广阔前景(见图 1-3)。

我国中生界白垩系和新生界下第三系生油泥岩地层中,大部分都已勘探到具有工业价值的泥岩油藏,泥岩裂缝油气藏具有广阔的前景和巨大潜力(见图 1-4)。

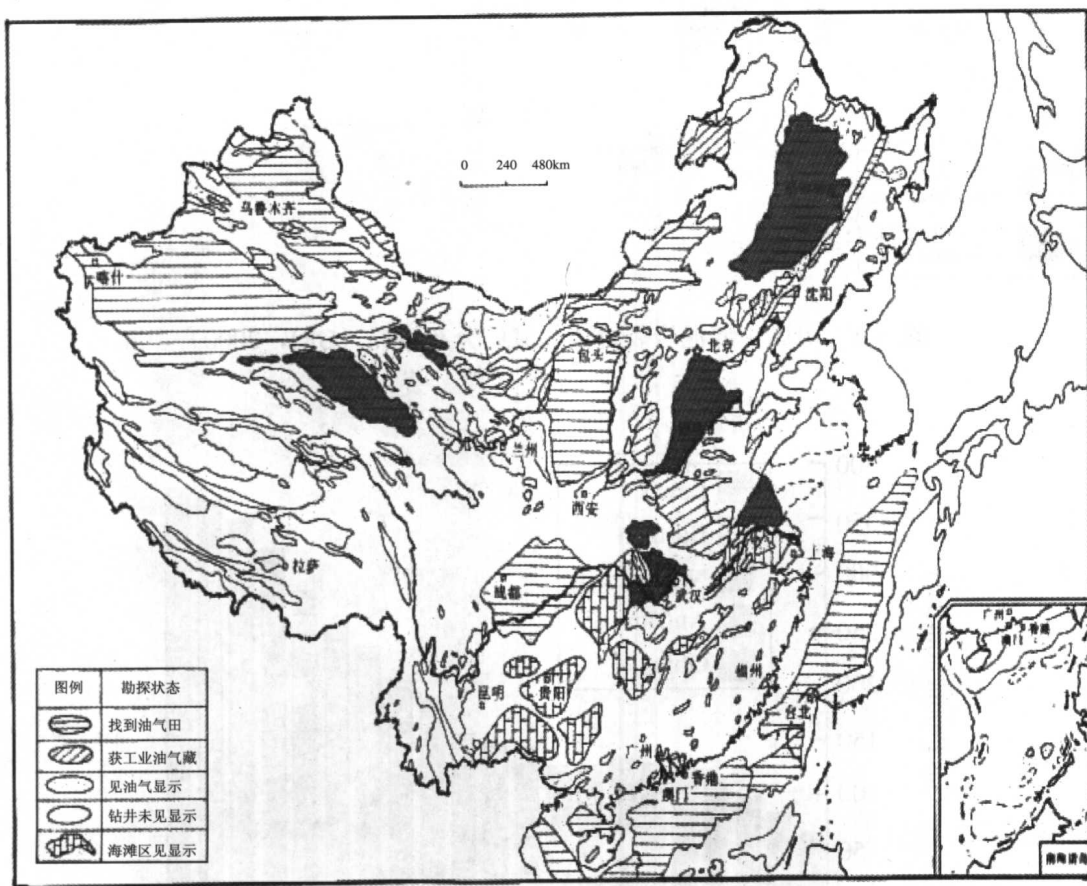


图 1-3 我国已发现泥岩裂缝油气藏分布图(李琦, 2000)

盆地		松辽盆地		渤海湾盆地		南襄盆地		江汉盆地		苏北盆地		酒西盆地		柴达木盆地				
		古龙		胜利		东濮		南阳		王场		东台		青西		茫崖		
新生界	第四系				平原组		平原组		平原组		平原组		东台组		酒泉组		七个泉组	
	上第三系	上新统	泰康组		明化镇组		明化镇组								疏勒河组		狮子沟组	
		中新统	大安组		馆陶组		馆陶组		上寺组		广华寺组				盐城组		油砂山组	
		渐新统	依安组		东营组		东营组		廖庄组		荆河镇组		三垛组				下干柴沟组	
	沙河街组	一段			一段	核桃园	一段	潜江组	一段	戴南组	一段	阜宁组	一段	火烧沟组				
		二段			二段		二段		二段		二段		二段					
		三段			三段		三段		三段		三段		三段					
	始古新统			孔店组		孔店组		大仓房组		荆沙组			阜宁组			一段		路乐河组
	中生界	白垩系	上统	明水组		(红层)		(红层)		(红层)		渔洋或江陵组		泰山-浦口组		犬牙沟组		
			下统	四方台组														
嫩江组																		
姚家组				五龙组								葛村组		新民堡群				
青山口组				石门组										中沟组				
泉头组														下沟组				
侏罗系		上统	营城组		金刚台组		金刚台组		金刚台组		重庆组		建德组		赤金堡组			
		中统	沙河子组								自流井组		象山组		龙凤山组			
			敖宝-洮南组															
			白城组															
备注：泥岩裂缝油藏井钻井		英12井 新19~11井		罗42井永54井 新郭3井		桥16井 文19井		红12井 魏9井		王北11~5井 王4~2井		Ycl井		柳1井 西参1井		深2井 中18井		

图 1-4 我国泥岩裂缝油气藏发育地层对比 (李琦, 2000)

1.1.2 胜利油田泥岩裂缝分布与勘探前景

从 1960 年以来, 胜利油田逐年都有泥岩裂缝油藏发现, 到 1990 年底, 累计有 368 口钻井在泥质岩地层中见油气显示 (见图 1-5), 其中代表性钻井有义 18 井、永 54 井、新郭 3 井、罗 42 井等, 测试日产原油可达 91.3 吨, 单井累产油可达到 13605 吨。

几个主要的洼陷均有泥质岩油藏发现, 以沾化和东营凹陷为最多 (见图 1-6)。

根据董冬等的研究,整个济阳坳陷的最有利评价区泥质岩资源量累计为 1.49×10^8 吨,其中沾化凹陷泥质岩资源量可达 6.9×10^7 吨,占资源总量的 68.58%,泥岩裂缝发现井的数量也是最多的,是最具潜力的泥岩裂缝油藏发育地区之一。

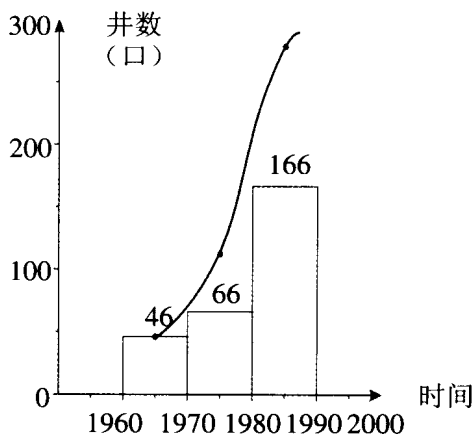


图 1-5 胜利油田泥岩裂缝井发现情况

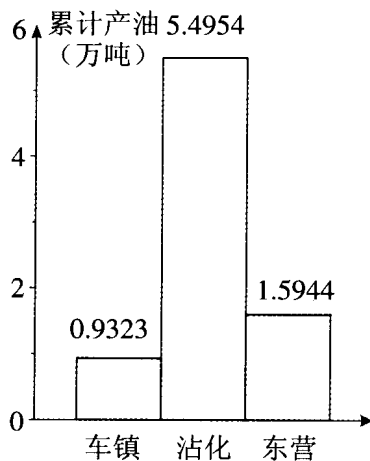


图 1-6 胜利油田主要凹陷泥岩累计产油量

1.2 裂缝预测方法研究的现状

裂缝性油气藏的勘探方法研究起步较晚,直到 20 世纪 70 年代国外才有专著发表,而我国裂缝性油气藏的研究主要是在 20 世纪 80 年代后有所进展,到目前为止,尚没有一套系统而完整的裂缝性油气藏的勘探与预测理论和方法。

国外在裂缝性油气藏的勘探方法研究方面,比国内起步得早,而且研究的进展很快。特别是近几年来,在各向异性研究方面,从理论研究、实验室测试到实际应用研究都取得了较大的进展。英国地质调查局,有一个全球十多家大石油公司赞助的各向异性项目 EAP(Edinburgh Anisotropy Project)。他们从 1988 年开始开展各向异性研究,已有十几年的历史。EAP 研究的物探技术主要还是多波多分量、转换波处理、海底地震、垂直电缆地震、VSP、全方位纵波等,

其应用领域主要是复杂断块的成像、岩石物性参数反演和裂缝检测。目前已取得一些理论研究成果和海上的应用实例及效果。但目前还没有做过陆上的方法试验,也没有生产性的三维多分量和全方位三维纵波裂缝勘探方法和试验,只是做了些理论与方法的探讨。20世纪90年代初美国能源部(DOE)设立了一个研究项目,目的在于从比较致密的储层中检测天然的裂缝带,当时预测21世纪美国将依靠从这些低渗透储层中采气。1996年, *Leading Edge* 第八期发表了一系列文章,从地质调查,遥感遥测研究,理论研究到实验室、岩心、露头、井间测量, VSP 和地面地震等。其中,三维三分量地震,二维九分量地震,三维多方位地震以及九分量的 VSP 等资料的利用取得一些效果。如利用快慢横波振幅异常检测裂缝,利用方位三维纵波资料研究方位的各向异性,对比不同方位纵波 AVO 与横波旅行时间的各向异性检测气藏的裂缝,利用井间、单井及压力瞬时测试作裂缝气藏的表征。他们在这些单项技术研究方面取得了较大的进展,但还缺少综合应用地质、物探、测井及钻井等资料分析裂缝的方位、组系、分布及计算裂缝的渗透率、孔隙度并预测裂缝横向和纵向上的发育的综合方法,也没有泥岩裂缝性油气藏检测的理论和应用实例。因此,该题目的研究,主要是在国内外前期研究的基础上发展裂缝性油气藏检测的理论和应用技术,并将地质、物探、测井、钻井等方法相互结合起来,研究一套进行泥岩裂缝性储集层各项参数的全面精细的勘探理论和方法技术。泥岩裂缝的勘探极为复杂,需要进一步发展物探新技术,如:孔隙度反演、地震属性参数提取、相干体断裂识别、速度分析方法、三维 AVA 分析等,特别是发展各种方位各向异性研究方法,以实现泥岩裂缝油气藏的识别和定量描述。

在国内,裂缝性油气藏的勘探方法研究起步较早,而且目前进展最快的是四川油田。他们在传统的野外露头观察与分析、岩心观察和分析及单点测井资料分析等地质勘探方法的基础上,较早地应用了物探方法。比较成功的方法是多层振幅比技术。从理论上分析,多层振幅比法对于干扰有归一化作用,同时还具有统计效应,可以削弱非目的层的不稳定性。该方法是从制作合成记录和建立断裂带地震模式入手,利用建立的模式,在多层振幅比剖面 and 振幅包络彩色剖面上拾取不同类型的振幅异常,编制裂缝带预测图(郭扬夫,1990)。该项技术在四川盆地川南永安场地区应用,其研究成果经与已知的9口探井进行