



复杂断裂带地震地质 识别技术研究

STUDY ON SEISMIC GEOLOGICAL
IDENTIFICATION TECHNOLOGY
OF COMPLEX FAULT ZONE

徐希坤 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

复杂断裂带地震地质 识别技术研究

徐希坤 著

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

内容提要

本书选取胜利油田探区多个典型的复杂断裂带,开展了不同类型复杂断裂带地震地质识别技术攻关研究,通过构造物理模拟试验、正演模拟技术及先进的断裂系统识别技术的研发及应用,详细分析了复杂断裂带成因机制、断裂要素,形成了适合济阳坳陷不同类型复杂断裂带的断裂系统识别的最佳技术策略,也为今后开展类似地区断裂系统识别提供了参考选择依据。

本书可供复杂断裂带(地震地质识别技术的)构造解释研究人员和石油院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂断裂带地震地质识别技术研究/徐希坤著.--

天津:天津科学技术出版社,2016.5

ISBN 978-7-5576-1187-3

I. ① 复… II. ① 徐… III. ① 断裂带-地震识别-研究 IV. ① P315.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第115089号

责任编辑:王 彤

责任印制:王 莹

天津出版传媒集团



天津科学技术出版社出版

出版人:蔡 颢

天津市西康路35号 邮编 300051

电话(022)23332674

网址:www.tjkjcb.com.cn

新华书店经销

山东金鼎彩印有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.25 字数 120000

2016年5月第1版第1次印刷

定价:48.00元

前 言

断裂是最常见的地质现象之一，断裂系统的精细解释是构造落实和圈闭有效性分析的基础。随着油气勘探开发的进一步深入，一方面，勘探目标越来越复杂，越来越隐蔽，对复杂微幅构造、复杂断裂系统的精细解释成为构造特征研究的重点；另一方面，随着勘探领域日益拓宽，勘探层系不断加深，新区新的构造样式的识别成为指导正确勘探的基础，发展精细的断层描述技术已成为高效勘探的迫切要求。

目前，相干分析技术是地震资料解释中识别断层和断层组合的重要技术之一，国内外学者提出并应用了很多描述方法，发展了 C1、C2、C3 三种相干算法。但在实际勘探过程中，由于地震资料分辨率和信噪比及相干算法等客观因素的限制，常规相干分析技术尚不能够满足精细勘探的需要，还存在诸如以下几个方面亟待解决的技术问题：微小断距断层的识别；低信噪比资料下的断裂系统识别；宽频带资料下断裂系统的识别；利用地震资料如何进行平移走滑断层、逆掩断层的有效识别；不同规模、不同级别的断层如何进行组合；岩性相变带、比较平直的河道和断层反映在地震剖面上都是不连续的信息，如何进行真假断层的识别等等。

为此，本书选取胜利探区多个典型的复杂断裂带，开展了不同类型复杂断裂带地震地质识别技术攻关研究，通过构造物理模拟试验、正演模拟技术及先进的断裂系统识别技术的研发及应用，在重点解剖顺向滑动断阶带、走滑扭张断裂带、复合型潜山断裂带的成因机制、断裂要素、

应力场特征和预测识别难点的基础上，形成了适合济阳坳陷不同类型复杂断裂带的断裂系统识别的最佳技术策略。这对丰富和发展济阳坳陷隐蔽油气藏勘探技术具有积极的作用，对新区勘探也有重要的指导和借鉴意义。

本书通过不同类型复杂断裂带正演模型的设计及研究，系统分析了影响断层识别的主要因素，包括倾角与垂直断距、水平断距、信噪比、地层产状、岩性等，并对这些影响因素一一进行分析，指出常规地震剖面上能够识别断层的尺度和条件。同时针对不同类型的复杂断裂带，开展了构造物理模拟试验的技术方法研究，并结合构造物理模拟试验的成果，详细分析了复杂断裂带成因机制、断裂要素，明确了济阳坳陷四种典型断裂带的构造样式、对应的地震地质特征及识别时的技术难点问题，从而为建立科学合理的构造解释模型提供了一种全新、有效的技术方法。

本书针对不同地震地质条件下断层识别的技术难点问题，开发了倾角扫描、多信息、多尺度相干、高阶统计量相干、分频相位扫描、曲率分析、边缘检测等针对性的断层识别新技术，阐述了每种技术的基本原理及特点。例如分频相位扫描技术，是近年来兴起的一项基于频率域的断层识别新技术。其基本原理是利用短时窗离散傅立叶变换，将地震数据由时间域转换到频率域，计算相位切片来观察并分析断层的纵横向变化特征。一方面利用分频手段突出断层响应特征丰富的最优势频带，即搜索不同级序断层都能“出露”的最佳频带；另一方面利用相位技术对地层产状变化敏感的特点，克服传统相干对垂向断距小的断层识别能力不足的问题。多信息相干技术则是利用水平方向多个相邻的地震道与垂向时窗组成的子体来计算道与道之间的相似性，同时可以计算出相应的倾角和方位信息，能得到更多的反映地震波形内涵的特征参数，具有

平滑去噪的作用，有利于区分断层与平直的河道等。这些技术的开发，解决了微小断距断层的识别、低信噪比资料下的断层识别及不同规模、不同尺度断层的识别及组合等问题，有效地提高了断层识别的精度和可信度，也提高了解释工作效率。

本书在断裂系统类型划分和地震响应特征研究的基础之上，系统全面地建立了针对济阳坳陷不同类型复杂断裂带的地震地质识别技术系列，并在辽东东走滑断裂带、桩海潜山断裂带、东营凹陷中央背斜带等区块展开应用，取得了很好的效果，与常规相干结果相比，识别精度明显提高，从而为研究区勘探井位部署及储量申报提供了最基础的数据，也为今后开展类似地区断裂系统识别提供了可供参考选择的方法。

本书是在尊敬的刘树根教授和徐国强教授悉心指导下完成的，感谢两位教授的辛勤劳动；感谢穆星首席、王长江主任热心的帮助和指导；感谢毕俊凤、董立生、管晓燕、张娟等提供的资料和帮助并为我最终完成该书清绘了大量图件；感谢胜利地质院地球物理室的全体同事。

最后，由于时间仓促和水平有限，书中可能有不足之处，欢迎同行们批评指正！

徐希坤

2016年3月

目 录

第一章 引 言.....	1
1.1 研究意义.....	1
1.2 国内外文献综述.....	3
1.2.1 构造物理模拟技术的研究历史与发展现状.....	3
1.2.2 断裂系统识别技术研究现状及技术发展趋势.....	11
1.3 主要研究内容及研究思路.....	20
1.4 取得的主要成果.....	22
第二章 陆相盆地典型构造样式及断裂系统特征.....	24
2.1 拉张型.....	24
2.1.1 滑动断阶构造样式.....	25
2.1.2 底辟构造样式.....	26
2.2 扭动构造样式.....	33
2.3 挤压构造样式.....	35
第三章 复杂断裂带地震地质模型研究.....	37
3.1 构造带物理模拟方法与应用.....	37
3.1.1 研究区概况.....	38
3.1.2 模型设计.....	39
3.1.3 实验过程.....	40

3.1.4 实验效果分析.....	42
3.1.5 地质综合解释.....	48
3.2 断层的正演模型研究.....	51
3.2.1 断层理论模型的影响因素分析.....	51
3.2.2 典型复杂断裂正演模型研究.....	57
第四章 不同地震地质条件下断裂系统识别技术.....	62
4.1 倾角扫描技术.....	62
4.2 高阶统计量相干技术.....	64
4.3 分频相位扫描技术.....	68
4.4 边缘检测技术.....	72
4.5 多尺度相干分析技术.....	76
4.6 多信息叠合相干技术.....	78
第五章 不同类型复杂断裂带识别技术.....	85
5.1 辽东东走滑断裂带断层识别技术研究.....	85
5.1.1 区域地理位置.....	85
5.1.2 勘探概况.....	85
5.1.3 基本构造特征.....	86
5.1.4 断层识别及断裂系统组合研究.....	90
5.1.5 实际应用效果分析.....	100
5.1.6 认识.....	103
5.2 东营凹陷中央背斜带复杂断裂带识别技术研究.....	104
5.2.1 区域概况.....	104
5.2.2 断层识别技术的开发应用.....	106

5.2.3 应用效果分析.....	109
5.3 桩海潜山断裂带识别技术研究.....	114
5.3.1 区域地理位置.....	114
5.3.2 勘探概况.....	114
5.3.3 断裂发育特征.....	115
5.3.4 构造演化特征.....	118
5.3.5 储层发育特征及与断裂的关系.....	119
5.3.6 断层识别及断裂系统组合研究.....	120
5.3.7 应用效果对比分析.....	122
结 论.....	125
参考文献.....	128

第一章 引言

本章针对复杂断裂系统精细解释的重要性和常规相干技术在解决特定地震地质条件下断裂系统识别时存在的问题，提出研究工作的意义，简述了国内外构造物理模拟和断裂系统识别技术的研究现状和发展趋势。介绍了主要研究内容及研究思路。最后，阐述了研究的成果及认识，列出了研究工作的创新点。

1.1 研究意义

断裂是最常见的地质现象之一，是指岩层或岩体顺破裂面发生位移的一种现象。断裂控烃理论指出：“断裂是陆相盆地控制油气生、运、聚、散和分布的根本原因；断裂与油气藏的关系是枝与果、藤与瓜的关系；科学的勘探思路是以断裂为基本线索，沿枝（断裂）摘果（油气藏），顺藤（断裂）摸瓜（油气藏）”^[1]。所以，断裂系统的精细解释是构造落实和岩性分析的基础。有关断层解释的方法很多，前人也有不少总结^{[2]-[8]}。一般情况下，较大的断层可以通过盆地范围内应力场分析、变形机理分析以及了解工区范围内的构造样式，依据地震时间剖面特征进行解释。断层在地震时间剖面上往往表现为：反射波同相轴错断；标准反射同相轴发生分叉、合并、扭曲、强相位转换；反射同相轴突然增减或消失，波组间隔突然变化；反射同相轴产状突变，反射零乱或出现空白带；特殊波的出现等等，可根据这些特征来判别解释断层。

但是应该看到，随着油气勘探开发的进一步深入，一方面，勘探目

标越来越复杂，越来越隐蔽，对复杂微小构造、复杂断裂系统的精细解释成为指导勘探成功的关键；另一方面，随着勘探领域日益广泛，勘探层系不断加深，新区新的构造样式的识别成为指导正确勘探的基础，发展精细的断层描述技术已成为勘探形势的迫切要求。

目前，相干分析技术是地震资料解释中定量识别断层和断层组合的重要技术之一，国内外学者提出并应用了很多描述方法，发展了 C1、C2、C3 三种相干算法，也自行研制了诸如高阶统计量相干、边缘检测等一些新的相干算法和相应的软件。但是，在实际勘探过程中，由于地震资料分辨率和信噪比及相干算法等各种客观因素的限制，常规相干分析技术尚不能够满足勘探的需要，存在诸如以下几个方面亟待解决的技术问题：微小断距断层的识别；低信噪比资料下的断裂系统识别；宽频带资料下断裂系统的识别；利用地震资料如何进行平移走滑断层、逆掩断层的有效识别；不同规模、不同级别的断层如何进行组合；岩性相变带、比较平直的河道和断层反映在地震剖面上都是不连续的信息，如何进行真假断层的识别等等。

为此，本书选取胜利探区多个典型的复杂断裂带，进行不同类型复杂断裂带地震地质识别技术攻关研究，通过构造物理模拟试验、正演模拟技术及先进的断裂系统识别技术的研发，在重点解剖顺向滑动断阶带、走滑扭张断裂带、复合型潜山断裂带的成因机制、断裂要素、应力场特征和预测识别难点的基础上，形成在现有资料和技术开发应用状况下，适合济阳坳陷不同类型复杂断裂带的断裂系统识别的最佳技术策略。这对丰富和发展济阳坳陷隐蔽油气藏勘探技术具有积极的作用，对新区勘探也有重要的指导和借鉴意义。

1.2 国内外文献综述

1.2.1 构造物理模拟技术的研究历史与发展现状

(1) 构造物理模拟技术的研究历史

构造物理模拟技术是采用物理模拟的方法再现构造发育过程的一种方法,是帮助地质学家认识构造变形过程、研究构造形成机制的重要方法。目前,构造物理模拟实验的基本原理实质就是变形几何法,即几何条件是构造变形的制约因素。该方法基本不考虑模型的应力大小,根据实际研究对象确定模型的边界条件和应变方式,选择合适的材料,研究随应变变量增加模型的变形特征和演化过程。

构造模拟实验经历了大约 180 余年的发展历史。著名地质学家、地质构造模拟实验的先驱 James Hall(1761~1832)最早用模拟实验或模型实验方法再现了各种构造形态的形成过程,拓展出了构造地质学研究领域内一门新的学科。1849 和 1858 年 C.F.Navmann 是世界上第一个用原岩作为实验材料,开展岩石破裂变形机制的构造模拟实验。1878 年, G.K.Gilbert 在实验室模拟了侵蚀过程。1894 年, B.Willis 开展了阿巴拉契亚山脉构造成因机制的模拟实验,通过模拟实验提出能干岩层(Competent layers)和非能干岩层(Incompetent layer)在褶皱过程中的形变特征,建立了岩石性质是决定褶皱类型的概念。

进入 20 世纪后,构造模拟实验引起许多构造地质学家的浓厚兴趣。1920 年, F.D.Adams 用大理岩材料在挤压作用下进行了流动实验;1914 年, W.H. Hobbs 对弧形构造的形成与发展及其形态的实验研究;1920 年, W.J.Mead 用石蜡在常温下进行了褶皱形成过程的模拟实验;1926 年, S.Tokuda 做了关于日本海附近和日本本土弧形构造的模拟实验;

1929年, Riedel 用湿粘土材料模拟了简单剪切作用下的破裂实验; 同年, C.M.Nevin 对盐丘的成因过程进行了模拟实验研究; 1930年, H.Cloos 用湿黏土模拟了莱茵地堑的形成过程。到 20 世纪 50 年代末期, 模拟实验研究已逐步形成一种高潮, 但从模拟各种构造形态的成因机制来说, 它们并没有形成一套完整的实验分析方法以及各种相似条件的选择等。直到 20 世纪 80 年代末, 物理模拟和数值模拟两种方法的相结合, 推动了实验构造地质学的进一步发展, 使实验构造地质学的研究工作不但从理论, 而且从方法上又向前迈进了一大步, 有了新突破。

我国构造物理模拟实验学始于 20 世纪 20~30 年代, 李四光教授就开展了“山”、“歹”、“多”字型构造形迹成因机制的黏土物理模拟实验, 开创了我国构造物理模拟实验研究先河。张文佑教授自 20 世纪 40 年代开始, 也进行了大量的断裂、褶皱方面的实验研究, 论述断裂的形成与发展规律, 并结合中国与世界地质构造实际, 提出断块构造理论, 并提出“定凹探边”、“定凹探隆”的指导寻找油气的原则, 对我国开发研究复杂断块油气藏具有指导意义。

国内众多学者都进行了模拟实验研究, 对构造物理模拟实验的发展作出了贡献^{[9]-[12]}。如中国科学院地质研究所单家增, 长期致力于构造模拟实验研究, 曾为石油部门莺歌海盆地模拟了泥底辟形成的机制, 进行了营口—佟二堡断裂带成因机制、对称褶皱形成以及剪应力作用下构造变形等方面的研究^{[13]-[15]}。钟嘉猷开展了多种材料、不同形式和方法的实验研究^[16]。周建勋运用该实验对伸展断层系统、黄骅盆地新生代构造成因、渤海湾盆地新生代的构造形成机制、半地堑反转构造等各种构造做了大量的实验研究^{[17]-[18]}。

(2) 构造物理模拟技术的研究现状

现在,构造物理模拟实验受到越来越多构造地质学家的重视,在实验理论、技术、材料和方法等方面取得了很大的进展。

① 实验理论的突破

随着时间的推移,地球科学工作者研究构造变形的范畴已从弹性力学扩展到塑性力学、流变学等领域,实验理论日趋完善。

在构造模拟实验发展史中,量化概念也越来越突出,人们尽可能用维量概念来描述变形过程、特性和动力学特征。在构造模拟实验中,可以依据驱动力的作用形式和量值、位移量或应变率、构造形迹的几何参数等,半定量乃至定量给出应力-应变、应力-位移、深度-变形几何参数等一系列数据,使在地质体中不可能连续测量到的各项数值,在实验室条件下成为现实。构造模拟实验的深入发展,加快了地质科学研究由定性描述向半定量乃至定量分析的进程,为进入定量研究阶段奠定了基础,如中国石油大学的构造物理模拟实验仪,由中国科学院地质研究所钟嘉猷教授在原有仪器的基础上设计、中国石油大学(华东)仪表厂研制,根据实验设计要求可完成伸展构造、收缩构造、升降构造、(剪切)走滑构造、反转构造及叠加构造等多种构造样式的变形过程的物理模拟实验。该实验仪将手工操作改为自动控制,可进行测试数据的自动采集与处理以及过程摄影和图象采集,并通过调节平流泵的流量控制施力的大小,实现了构造物理模拟实验的定性到半定量-定量研究。

② 实验技术和材料的创新

自1894年B.Willis成功的研制出世界上第一台构造模拟实验装置以来,许多新型实验装置或仪器相继问世,逐步解决了构造模拟实验中

最为棘手的驱动载荷如何施加于实验模型上的问题。同时，实验装置也由手动操作逐步变为自动控制，定量施力，并进行数据和图像的自动采集，实现构造物理模拟实验的定性到半定量-定量研究。在物理模拟方法发展过程中，已使用了多种具有不同力学参数、相态、粒径等的实验材料。依据相似理论中的相似判据，这些实验材料可以一一对应岩石圈不同壳层的岩石介质。由于地质体中岩石的物理特性非常复杂，在选取实验材料时，越来越尽可能考虑地层或岩石之间的物理和力学特性的差异。进入 20 世纪 90 年代以来，构造模拟实验已拓展到岩石圈流变学的研究，涉及到上地壳、下地壳和上地幔中几百种不同岩性和不同物性的岩石物质。现在模拟实验已使用了一些天然材料。现在物理模拟实验中，对于地壳浅层次的构造变形，材料多选用天然石英砂，标志层可染色干燥后使用，不影响其物理性质。经验证天然石英砂是模拟地壳浅层次构造变形的理想相似材料^{[19]-[21]}。在构造模拟实验中，用天然材料替代人工合成的化学材料，可以缩短实验与实际地质条件之间的距离，提高实验结果的可靠性和准确度，是构造模拟实验发展的必然趋势之一。

③ 构造物理模拟方法的应用

首先，在理论应用方面，McClay、Ellis 等人近年来一直从事构造模拟实验的研究工作，主要研究伸展断层系统(*extensional fault systems*)。利用砂箱为实验工具，砂、黏土、云母等为主要实验材料，对在不同底面及边界条件控制下、不同的能干性岩层中伸展断层系统的几何样式、形成过程进行了深入的研究，为深入理解伸展断层系统的几何学、动力学演化过程提供了有利的依据。McClay 等(1990)对铲形主拆离断层控制的伸展构造变形进行了构造物理模拟，获得了许多重要的认识^[22]。

此外,利用构造物理模拟方法研究纯挤压条件下以及俯冲环境中楔体的形成及演化已取得很大进展。对俯冲环境楔体中逆冲断层的形式、演化及其组合形式也进行了模拟和研究工作,指出楔体前缘逆冲断层系呈前进序列发展,这为楔体的进一步研究奠定了基础。

钟嘉猷教授(1998)曾在中国石油大学(华东)运用构造物理模拟实验装置,研究了在纯挤压条件下逆冲断层的发育演化。

其次,在石油地质的应用方面,构造物理模拟实验作为一独特的实验方法,可以在实验室条件下再现含油气构造体系的形成和演化过程,追踪它们形成的动力学成因机制,是油气勘探研究由定性描述跨入半定量分析乃至定量分析的有效途径,近十余年来被广泛应用于构造地质学和石油构造地质学研究领域以及石油勘探研究领域。

比如采用构造物理模拟实验方法来研究低级序断层组合方式,可以模拟在不同构造应力作用下,受高级序断裂体系分布限制的低级序断裂体系的形成和演化,以认识低级序断层发育分布规律,从而指导高级序与低级序断层以及低级序断层之间的组合,为复杂断块油藏开发中后期挖潜提供理论依据^[23]。王光付等(2004)以东营凹陷中央隆起带为例,按辛镇构造的地质条件进行构造物理模拟实验。模拟结果证实,在拉张应力作用下,两条平行的高级别断层之间可以形成低级别的弧形断裂,弧形断裂包括单个弧形、波状弧形和套叠式弧形等不同的构造样式。弧形断裂分布区往往是多力系汇聚区,是油气存储和成藏的极为有利的区域^[24]。多样式的弧形断裂体系为油气藏的形成提供了良好的构造地质条件,并指出,东营凹陷约85%以上的油气资源分布与弧形断裂体系有关。

朱战军等(2002)在《挤压构造的砂箱物理模拟实验研究现状》一

文中,阐述了“物理模拟实验可以直观形象地再现挤压构造的发生发展、继承与改造、盆地形成演化动力学等多种构造现象,因此被众多盆地构造研究者采用,成为挤压构造和盆地动力学研究的主要方法之一”的思想,系统总结了国内外研究集体近年来的研究成果,指出目前开展的挤压构造物理模拟主要有五种类型,分别为地幔对流与板块俯冲的物理模拟、挤压造山作用的物理模拟、推覆体/双冲构造的物理模拟、褶皱、逆断裂等基本构造的物理模拟、挤压盆地的物理模拟,同时分析了砂箱实验目前还存在的主要问题^[25]。

王颖(2004)在充分认识桩西潜山形成的边界条件的基础上,充分考虑了各个时代地层岩性特征,对实验材料进行了严格、精确的配方,以相似理论为指导,首次采用物理模拟实验的方法,模拟了济阳拗陷内构造最为复杂的褶皱型潜山——桩西潜山的形成过程,成功解决了复杂潜山演化过程中理论研究的多解性问题,为褶皱的物理模拟提供了一个良好的实例^[26]。

同时,物理模拟实验也是研究裂陷盆地构造形成过程和机制的重要方法。盆地边界几何条件(包括裂陷边界几何形态、边界断层的剖面几何形态及性质和裂陷伸展方向)是决定裂陷盆地伸展构造形成特征的关键因素。吴兴宁和周建勋(2000)曾对渤海湾盆地构造进行了模拟实验,实验研究结果表明渤海湾盆地内部复杂的构造面貌可能与其复杂的边界几何形态有很大关系,而且其实验中的膝状刚性边界裂陷均匀伸展模型显示,同一伸展变形过程可因盆地伸展边界方向的变化,在裂陷盆地内部形成不同走向的正断层,断层走向随着盆地伸展边界方向的改变而转向,这些不同走向的正断层并非是不同的期次构造变形的产物。如运用