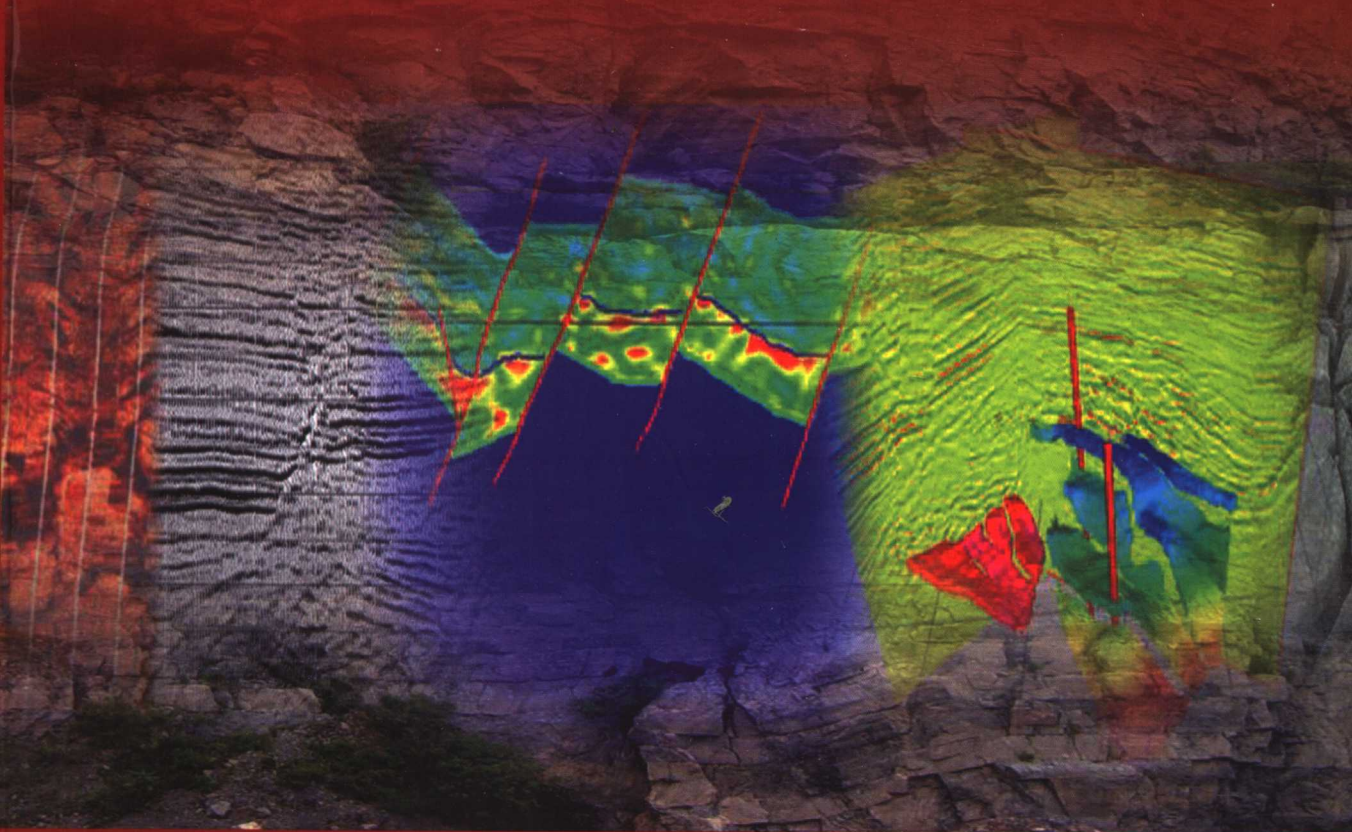


碳酸盐岩潜山储层缝洞预测

刘传虎 贺振华 黄德济 著



石油工业出版社

碳酸盐岩潜山储层缝洞预测

刘传虎 贺振华 黄德济 著

石油工业出版社

内 容 提 要

碳酸盐岩潜山缝洞型油气储层的识别和预测具有很强的挑战性。面对挑战,本书探讨了储层裂缝、孔洞发育带地震识别和预测的可能性、基本理论与方法;以物理模型实验和数值模拟结果展示了潜山缝洞带地震波响应的基本规律与特征;研究了利用三维地震资料对缝洞储层进行多尺度边缘检测的系列方法和应用地质、地震、测井、钻井资料等多源信息进行综合预测的原则与方法;以济阳坳陷 GQ2 南潜山储集体、CB30 潜山储集体、NH 潜山储集体为例进行了地震检测和综合预测与分析。这些研究为潜山油气储层识别及其空间分布规律的认识提供了有价值的方法和依据。

本书适合从事油气藏勘探、开发和缝洞检测的工程技术人员和相关专业的高校师生、研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩潜山储层缝洞预测/刘传虎等著.

北京:石油工业出版社,2006.12

ISBN 7-5021-5825-1

I. 碳…

II. 刘…

III. 碳酸盐岩油气田-预测-研究-潜山

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 137339 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:www.petropub.cn

发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2006 年 12 月第 1 版 2006 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:10.25

字数:300 千字 印数:1—1000 册

定价:48.00 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

序一

世界上最早发现潜山油气藏是在1909年,当时美国在勘探新生界含油层系时,在俄亥俄州中部辛辛那提隆起偶然发现了摩罗县潜山油气藏。含油层为上寒武统铜岭白云岩,裂缝溶洞发育,连通性好,油井初期日产油20t左右。据统计,全世界236个大型油田中,砂岩油藏占59%,碳酸盐岩油藏占40%。碳酸盐岩油藏以石灰岩和白云岩油藏为主,是世界原油最大的来源之一。目前世界上已有40多个国家和地区在近60个沉积盆地中找到了碳酸盐岩油气田,其原油产量约占世界原油总产量的65%,主要来自中东、墨西哥和加拿大等地的碳酸盐岩油藏。

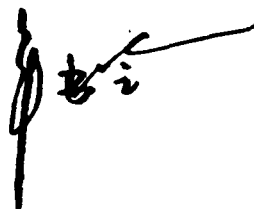
中国石油工业的发展,是独辟蹊径的。以中、新生代陆相沉积生油理论为指导,经过艰苦卓绝的努力,成为世界第五产油大国,并且是世界上唯一主要靠陆相油田建立起强大石油工业的国家。21世纪在勘探开发中、新生代陆相沉积的同时,应该以海相古生界和元古界沉积为基础,创建第二油气源,为石油工业持续发展增添后劲,实现我国油气的二次创业。目前,我国绝大多数含油气盆地已进入或即将进入高勘探程度阶段,包括潜山油气藏在内的各类隐蔽性油气藏成为比20世纪更为重要的勘探开发目标。在过去的10多年间,隐蔽性油气藏研究为我们稳定东部、发展西部的石油勘探战略作出了重要贡献。以隐蔽性砂岩岩性油气藏为主的研究已形成了较为完善的理论和勘探开发配套技术,而潜山油气藏因其特殊性和复杂性,个体解剖较多、系统研究较少,其理论和勘探开发配套技术尚须进一步充实和完善。

我国石油工业的发展历程,是一个艰苦的科学技术攻关的历程,是一个不断解放思想、升华认识的过程。对于复杂、多变的潜山油气藏的认识更是如此。比较系统地著述潜山油气藏勘探开发的实践与理论、工程技术与典型实例,对深化完善潜山油气成藏理论和技术,指导潜山油气藏的勘探,提高油气开发水平,会起到积极的推动作用。

本书作者是年轻的石油工作者,他们以科学的态度,调研吸收了国内外多个盆地潜山油气藏研究的成果和勘探实例,特别是在“九五”和“十五”以来的最新研究成果的基础上,系统地总结了国内外潜山油气藏勘探开发的实例和成果。专著内容丰富,论述详尽,具有较高的理论水平和实际应用价值。

相信专著的出版,必将给人以启迪,同时也有助于广大石油科技工作者和现场工程师更好地了解 and 掌握多类型复杂潜山的成藏理论与勘探开发技术,加快我国的油气工业发展。

俄罗斯自然科学院和工程院院士
中国石油化工股份有限公司董事
中国石油化工集团公司原党组成员
中国石油化工股份有限公司原高级副总裁



2006年6月28日

序二

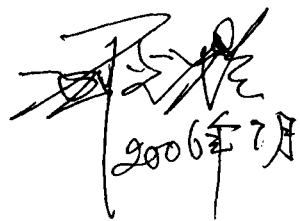
石油天然气是战略性资源。能源问题已经成为制约国家经济发展和安全的重要因素。随着近几年能源需求量的增大,国家对能源的关注程度越来越高,能源企业特别是石油企业责无旁贷地肩负起为国家的发展补充血液和能量、保卫国家安全、促进中华民族伟大复兴的历史使命。

随着我国各含油气盆地勘探程度的不断提高,特别是“九五”以来,以胜利油田为代表的东部各陆相含油气区逐渐进入以地层—岩性隐蔽油气藏为主要目标的勘探阶段,并逐步向深层、潜山油气藏勘探发展。海相油气藏是在世界油气生产中占有极其重要地位的油气藏类型,在世界各大沉积盆地的勘探中均有大的发现。据统计,世界海相储层的油气产量约占世界油气总产量的60%。中东地区石油产量约占全世界产量的2/3,其中80%的含油层是海相的。北美石油产量的1/2来自海相地层。在原苏联的生物礁油田内,石油储量约占整个海相碳酸盐岩地区储量的31%,天然气占29%。近年来,一方面在我国东部陆相断陷盆地下面发现了古潜山,另一方面在南方海相盆地和西部古克拉通盆地的碳酸盐岩油气藏勘探中也都获得很大进展。古潜山油气藏在全国各盆地的潜山油气藏勘探开发中获得了可观的储量和产量,已成为我国各油气田勘探开发的重要接替资源,越来越引起石油界的广泛关注。

海相碳酸盐岩地震勘探的主要难点表现在:(1)我国海相碳酸盐岩一般发育在下古生界,埋藏深(3000~6000m不等),地震资料分辨率、信噪比较低;(2)潜山面变化剧烈,绕射干扰强,地震资料处理困难;(3)储层非均质性严重,储层的预测和识别难;(4)油藏聚集规律复杂,控制因素较多,应用地震资料难以全面掌握其规律性。因此,碳酸盐岩潜山油气藏形成条件及其岩性、岩相、储层特征,裂缝孔洞发育情况,以及油气藏形成的复杂性、隐蔽性、空间不均匀性和随机性,使其勘探难度相应加大,勘探配套技术受到一定的限制。

本书作者正是在分析了碳酸盐岩潜山储层缝洞发育特点的基础上,从碳酸盐岩潜山储层缝洞带的地质和物理基础出发,设计不同类型的储层缝洞分布模型,利用射线理论和波动方程理论模拟其地震响应特征,进而推导得到关于多尺度储层缝洞带地震预测的多种新技术和新方法。这些方法有的已在学术刊物上发表,并得以在多个油区推广应用,特别是在济阳拗陷的胜利油区、华北油区,以及在塔里木盆地塔河油田的储层缝洞预测中均取得良好的预测结果。该书的出版,将为完善我国地震储层预测新技术增添新内容、拓展新领域,并为国内外碳酸盐岩潜山油气藏的勘探提供技术方法的指导和借鉴,对推动我国各含油气盆地的碳酸盐岩潜山勘探发挥有效的作用。

中国科学院院士



2006年7月

前 言

潜山(Buried hills)一词,较早见于赛德尼·鲍尔斯(Sidney Powers)的论文《潜山及其在石油地质学中的重要性》,后来,其他一些地质学家也使用了这一术语,如莱复生(Levorsen)在其《石油地质学》一书中就提到潜山,其原意是指在盆地接受沉积前就已经形成的基岩古地貌山,后来被新地层覆盖埋藏而变成了潜伏山。可见,一个潜山的构成,必须具备三个基本地质条件:一是经过侵蚀;二是相对于周围侵蚀面有一个局部隆起;三是被新沉积物所掩埋的。

目前所指的潜山比上述概念扩大了。凡是现今被不整合埋藏在年轻盖层之下,属于盆地基底的基岩凸起,都称为潜山,而不论其成因如何和形成时间的早晚。根据这个定义,按形成时期,潜山可分为两大类。一类是具有古地貌特征的“古潜山”,也包括那些受构造作用控制的、具有后期生长特点的“古潜山”。另一类是在上覆盖层沉积前尚不存在或仅仅只有微弱的地貌显示,主要是在盖层沉积期间或沉积之后,由于发生了新的褶皱、断裂、火山喷发等构造变动而形成的“后成潜山”。虽然后成潜山一般失去了典型的古潜山含义,但它也是基岩凸起,其顶面形态十分相像,也是发生在盆地基底,位于盆地沉积物不整合之下,也能形成“新生古储”式的潜山油气藏。“古潜山”和“后成潜山”虽然成因不同,但有时难以严格区分,在勘探方法上,也大体相同,所以统称潜山。这样的归类主要是从找油实际需要出发的。

研究结果表明,世界碳酸盐岩储层可归纳为6种类型:(1)不整合面之下的石灰岩和白云岩,孔隙类型:内模孔隙、孔洞、受溶解增大的裂缝、角砾孔隙。成因:近地表的白云石化或溶解作用、裂缝和角砾化作用。代表性实例:美国阿纳达科盆地、威利斯顿盆地、二叠盆地。(2)潮上带到潮下带的白云岩,孔隙类型:晶间孔隙、粒间孔隙、内模孔隙、孔洞。成因:礁体出露水面在淡水透镜体之下海水与淡水的混合带形成的白云石;浓缩卤水回流交代碳酸盐沉积物而成的白云石;浓缩卤水受蒸发作用往上提升交代碳酸盐沉积物而成的白云石;碳酸盐沉积物深埋于地下而成的白云石。代表性实例:美国密执安盆地志留纪尼亚加拉礁的白云岩储层;威利斯顿盆地奥陶纪红河组的白云岩储层。(3)鲕粒、团粒浅滩,孔隙类型:粒间孔隙、内模孔隙、孔洞。成因:原生粒间孔隙或颗粒被溶解而成的内模孔隙。代表性实例:沙特阿拉伯、阿联酋上侏罗统阿拉伯组、卡塔尔上侏罗统阿拉伯组。(4)礁(包括与礁有关的储层),孔隙类型:生长骨架孔隙、受溶解作用增大的孔隙,特别是礁体出露水面受淡水淋滤而成的孔隙。成因:骨架之间的原始孔隙、礁前角砾之间的孔隙。代表性实例:美国二叠盆地的石炭—二叠纪马蹄形礁、俄罗斯乌拉尔地区礁相和台地相的碳酸盐岩。(5)泥晶灰岩、白垩内的微孔隙,孔隙类型:粒间孔隙。成因:在灰泥沉积稳定期生成的微方解石之间的孔隙,这表明原始灰泥以方解石占优势。代表性实例:阿联酋早白垩世萨马马群的北海油田,如埃科菲斯克油田。(6)泥晶灰岩内的微裂缝,孔隙类型:裂缝、微裂缝。成因:受挤压力而产生的张性裂缝。代表性实例:墨西哥白垩纪盆地塔毛利帕斯组。

碳酸盐岩储层在世界油气生产中占有极其重要的地位。据统计,世界碳酸盐岩储层的油气产量约占世界油气总产量的60%。中东地区石油产量约占全世界产量的2/3,其中80%的含油层是碳酸盐岩。北美的碳酸盐岩产量约占北美整个石油产量的1/2。在原苏联的生物礁油田内,石油储量约占整个碳酸盐岩储量的31%,天然气占29%。

由于碳酸盐岩本身的复杂性,如盆地形成时间间隔长、埋深跨度大、非均质性强、裂缝溶洞发育的影响因素比较多、老地层经历多期构造运动的改造等,从而导致碳酸盐岩储层成因机理、油气成藏机制和油气田分布的规律不易掌握。

碳酸盐岩储层受古地理环境因素的影响大,如构造运动、海平面升降和白云岩化等的后期改造作用。碳酸盐岩储层形成后,会发生剧烈的成岩作用,使碳酸盐岩的矿物组成和孔隙结构发生变化。这种变化在地震资料上有无响应,地震属性可否对储层的岩性、物性及含油性的变化进行定量预测,这些工作前人探索过很多,也涌现出多种储层预测技术,但由于碳酸盐岩储层的复杂性和大深度下地震资料品质的影响,预测精度受到不同程度的限制。

本专著是在“十五”期间由时任胜利油田有限公司副总经理兼总地质师的李丕龙教授全面负责的七大重点攻关研究项目之一——“潜山油气藏勘探综合研究”科研攻关课题研究成果的基础上总结编写而成的。该课题包括了“潜山油气藏概论”、“潜山构造与油气成藏”、“碳酸盐岩潜山储层特征与油气成藏”、“碳酸盐岩潜山储层缝洞模拟和预测”及“非碳酸盐岩潜山油气藏”五方面,较为系统地总结了碳酸盐岩潜山和非碳酸盐岩潜山的勘探理论和技术方法,希望对加快潜山油气藏的勘探起到推动作用。

本书所涉及的研究工作得到了国家自然科学基金项目 40174039、40474044 和国家“十五”科技攻关项目 2001BA605A—09 的资助。同时得到了中国石化胜利油田有限公司科技系统的大力支持和帮助。

本书第一章由刘传虎、贺振华编写;第二章由贺振华编写;第三章、第四章由贺振华、刘传虎、董臣强编写;第五章由黄德济编写;第六章、第七章由刘传虎、黄德济、王军、冯德永、马丽娟编写;第八章由刘传虎、何建军、韩宏伟编写。最后全书由刘传虎、贺振华统稿并定稿。

先后参与与本书内容有关的项目研究和图件编制的还有胡光岷教授、曹军副教授,何义中、桂志先、杜正聪、文晓涛、熊晓军博士,宁忠华、迟新刚、贺锡雷、陈学华等硕士研究生。黄皓等参加了文字打印和图件修编工作。成都理工大学“油气藏地质与开发工程国家重点实验室”和“地球探测与信息技术四川省重点实验室”对本书的出版也给予了有力支持;

承蒙俄罗斯自然科学院和工程院院士、中国石油化工股份有限公司董事、中国石油化工集团公司原党组成员、中国石油化工股份有限公司原高级副总裁牟书令先生,中国科学院院士刘光鼎先生在百忙中为本书撰写序言。本书编著得到了中国石化副总地质师蔡希源教授、油田部李阳教授、中国石化西部新区勘探指挥部李丕龙教授、胜利油田有限公司张善文教授、中国科学院地质与地球物理研究所杨长春研究员等专家学者的指导和支持,他们对全书内容提出了宝贵的修改意见。《储层地球物理》期刊常务副主编付瑾平高级工程师对初稿进行了文字加工,书中内容和图件也吸收了胜利油田及其他相关单位的研究成果,在此一并表示衷心的感谢!

潜山缝洞型油气储层的模拟、识别和预测具有很强的挑战性,许多研究尚处于探索阶段。由于笔者掌握的资料和研究、认识水平有限,书中不完善之处在所难免。诚望专家、学者批评指正。

作者

2006年10月

目 录

第一篇 碳酸盐岩潜山储层缝洞带地震预测原理与技术

第一章 绪论	(3)
第二章 碳酸盐岩潜山储层缝洞带地震预测的物理地质基础	(7)
第一节 碳酸盐岩潜山缝洞油气储层的一般地质特征	(7)
第二节 碳酸盐岩缝洞带地震检测的分辨率探讨	(9)
第三节 地震缝洞检测对原始资料的要求	(12)
第四节 裂缝储层物理模型实验与分析	(12)
第三章 碳酸盐岩潜山缝洞储层地震波正演模拟	(16)
第一节 含裂隙介质地震波传播理论	(16)
第二节 缝洞储层地震记录的波动方程数值模拟	(22)
第三节 弹性—声学波动方程数值模拟	(31)
第四节 济阳坳陷古潜山缝洞储层典型剖面的正演模拟	(33)
第五节 含裂缝地质模型的共炮点地震记录模拟与偏移	(37)
第四章 碳酸盐岩潜山油气缝洞储层地震检测方法	(41)
第一节 裂缝发育带的 3D 地震多尺度边缘检测	(41)
第二节 地震主参数缝洞检测	(43)
第三节 缝洞发育带地震检测的其他方法	(45)
第四节 含噪声地震缝洞信息的识别	(52)
第五章 碳酸盐岩潜山缝洞发育带综合预测	(55)
第一节 缝洞发育带综合预测的基本问题	(55)
第二节 缝洞发育带综合预测的技术关键	(55)
第三节 大中尺度地震勘探的地质任务	(56)
第四节 小尺度缝洞发育带地震信息的识别	(57)
第五节 碳酸盐岩储层缝洞发育带地震预测与评价	(60)
第六节 地震检测值分类量化标定方法	(68)
第七节 碳酸盐岩储层缝洞发育带多源多尺度信息的综合预测	(71)

第二篇 碳酸盐岩潜山缝洞发育带综合预测实例

第六章 GQ2 南潜山碳酸盐岩缝洞发育带综合预测	(81)
第一节 区域地质基本特征	(81)
第二节 潜山古地貌、古水系的展布特征	(83)
第三节 储层缝洞发育带的地震检测及其量化分级	(84)
第四节 潜山缝洞发育带地震预测与评价	(100)
第五节 GQ2 南潜山油气储集的有利区域	(107)

第七章 CB30 潜山缝洞储层综合预测	(111)
第一节 研究区地质构造及储层基本特征	(111)
第二节 地震主参数缝洞检测结果分析	(111)
第三节 小波分形指数法缝洞检测及分析	(118)
第四节 CB30 潜山储层缝洞的多源信息综合预测	(124)
第八章 NH 潜山储集层地震缝洞预测	(137)
第一节 研究区潜山储层的基本特征	(137)
第二节 主参数缝洞检测结果分析	(138)
第三节 广义希尔伯特变换缝洞检测结果分析	(142)
第四节 高阶统计量缝洞检测结果分析	(145)
第五节 多尺度边缘缝洞检测结果分析	(149)
参考文献	(152)

第一篇 碳酸盐岩潜山储层 缝洞带地震预测原理与技术

第一章 绪 论

随着油气勘探的不断深入,以胜利油田为代表的陆相主力含油气区逐渐进入以隐蔽油气藏为主要目标的勘探阶段,开发潜山油气藏成为油田增储上产的重要保证。

在潜山油气藏的勘探开发中,由于储集层非均质性一般都比较严重,储集层空间分布和变化规律的预测和描述是勘探开发的关键,也是其难点之所在。采用何种方法来实现对潜山储集层进行有效的描述也就成为勘探开发中的重要课题。因此急需总结、探索潜山地震描述技术,为潜山油气藏的高效勘探开发提供有力的支持。

潜山储层描述的难点:(1)地震资料品质相对较差;(2)潜山内幕储层非均质强;(3)潜山顶面速度变化大;(4)储层多数以裂缝、孔洞等为主,各向异性复杂。由于潜山地层在不同地区的发育情况及遭受风化剥蚀的程度不一样,因此不同区块不同地层的密度、孔隙度等岩石物性参数也不尽相同,其储层描述方法有本质区别。

在高角度平行排列的微裂缝介质中,地震波反射振幅随着方位角/偏移距的增加而降低。当方位角垂直于裂缝时,反射振幅随方位角与偏移距的降低率最高;而当方位角平行于裂缝时,反射振幅随方位角与偏移距的降低率最低。利用这一原理,开展全方位角的三维地震技术可以有效地预测裂缝的密度、方位和分布。

总体看,国外在潜山油气藏勘探及潜山储层研究方面,对潜山地质特征、储集层特征的描述较多,而对储层的地震预测与定量描述方面的论述较少,成熟的技术和方法也不多。国内任丘潜山油田、大港千米桥潜山和胜利埕岛油田三个地区的潜山油藏及潜山储层研究较深入,技术手段应用也较全面,基本代表了国内潜山油气藏研究的水平。

在2003年,《The Leading Edge》第七期上发表了3D/4C Enlilo: Azimuth processing and anisotropy analysis in a fractured carbonate reservoir一文,阐述了碳酸盐岩潜山缝洞处理新技术,并取得了良好的预测效果。另外,国内外潜山缝洞处理预测新技术较多,应用效果较好的有:(1)以叠前深度偏移为主的地震处理技术;(2)地震、重力联合应用;(3)古构造应力场反演技术;(4)测井约束波阻抗反演技术;(5)地震相干分析技术;(6)地震属性分析技术;(7)储层模糊评价技术等。

济阳坳陷的油气勘探实践表明,各凹陷基底岩系中的中生界砂岩、古生界石灰岩和震旦系花岗片麻岩均可形成古潜山油气藏。但由于受多期构造运动影响,古潜山断层组系复杂多样、地层风化溶蚀程度各异、裂缝尺度与形态变化万千,使其空间分布及内幕中有利于油气聚集和运移的缝洞发育带的空间分布规律性差、横向变化大。加之地震资料的分辨率不足,潜山油气藏勘探难度很大。为解决缝洞预测的难题,需要从理论基础出发综合利用物理、数值模拟,缝洞发育带地震检测原理与方法,以及地震、地质、测井、钻井、开发资料等多源信息对缝洞油气储层进行系统的研究。这些研究在目前十分必要,但具有相当大的探索性。本书的主要内容是这些探索性研究的一部分。

(1) 研究的主要内容。

①古潜山储集层缝洞系统地震检测和预测的物理地质基础。主要包括:古潜山缝洞分布的多尺度性与规律性;缝洞地震检测的分辨率与检测目标;定向裂缝密度、张开度和方位角的

地震响应特性(振幅、频率、相位、吸收衰减、速度、时差等)的物理模型实验;缝洞地震检测对原始地震资料的质量要求。

②古潜山缝洞储层地震波场特征的数值模拟。主要包括:含裂隙混合介质地震波的传播理论;含缝洞地层地震波传播的正演模拟与波动方程偏移;噪声压制与缝洞信息识别。

③缝洞发育带地震检测方法。主要包括缝洞发育带的3D地震多尺度边缘检测原理与方法;时频域主参数地震缝洞检测;缝洞发育带统计学检测方法与评价。

④典型地区古潜山缝洞发育带空间分布特征研究与分析。其内容有:济阳坳陷GQ2区奥陶系潜山缝洞发育带的地震检测与缝洞分布规律;济阳坳陷CB30井区潜山储集体缝洞发育带的地震检测和预测;NH潜山储集体缝洞发育带的地震检测和预测。

⑤古潜山缝洞发育带的综合预测与评价。内容包括:地震、地质、测井、钻井、开发等多源信息的综合预测方法;多种方法(物理模型实验、数值模拟、地质解释、地震解释、测井解释等)、多种属性参数(动力学参数、运动学参数等)的综合利用与预测、评价技术流程;储层缝洞发育带和有利的油气聚集区分析与评价。

整个研究工作的基本技术思路是围绕着缝洞带地震检测的必要性、可能性和缝洞综合预测结果的可靠性分析展开的。试图回答为什么要进行缝洞地震检测,能不能利用地震信息进行缝洞检测,如何进行缝洞检测,如何消除检测结果的多解性和提高预测结果可靠性等一系列问题。为较好地回答或部分回答这些问题,我们采用了理论与实践相结合、物探和地质相结合、物理模型实验和数值模拟相结合、正演模拟与实际资料解释相结合、面上的三维地震检测与控制点上的钻井、测井、开发资料相结合、主要波场特征(或属性)和辅助特征相结合的技术路线。并在实际工作中注意新方法、新技术特别是创新性方法技术的开发与应用,力争为缝洞油气储层预测这一世界性研究难题的尽早突破做出应有的贡献。

(2) 关键问题与进展。

①关于缝洞储层地震检测的可能性。

a. 根据含裂缝介质的Hudson理论,给出了裂缝(或缝洞)密度与反射系数的关系式,进而说明利用反射波的能量、振幅检测或反演裂缝密度是可能的。

b. 通过定义缝洞密度,指出利用地震波场特征检测的是缝洞密度以及与其密切相关的缝洞发育带而不是单个的缝和洞。由比较小的缝和洞组成的缝洞发育带,只要其密度足够大,有一定的空间分布范围,利用地震波场特征或属性参数差异是有可能识别的。

c. 阐述了地震波Fresnel-Wediss分辨率的概念,指出该分辨率应成为度量缝洞密度的参照单位。通过极限带宽和检波器间距大小的比较与分析,进一步说明用现有的地震检波器间距进行观测,仍有可能记录到单个裂缝宽度远小于检波器间距的地下小缝洞组成的发育带的波场信息。

d. 利用物理模型实验研究了裂缝密度、张开度、定向垂直裂缝的方位与地震纵/横波速度、振幅、频率、品质因子的相互关系,观测到在裂缝密度较大时出现的横波分裂现象。发现地震波动力学特征参数对裂缝张开度的变化较运动学参数敏感,为裂缝检测参数的选择提供了依据。

e. 进行了缝洞储层的地震波正演模拟和强横向变速的波动方程偏移成像方法研究,为缝洞储层正、反演解释提供了工具。

②关于缝洞发育带的地震检测与识别。

缝洞发育带地震检测与识别的方法很多,各有特色和局限。应用效果较好较广的主要有

以三维地震资料为基础的多尺度边缘检测、相干数据体分析和时频域地震主参数缝洞检测等方法。一些新的检测方法,如小波分形指数法、中心频率法、高阶累积量(3阶)双谱法、改进的模糊边缘检测法(IFED)、广义希尔伯特变换缝洞检测法等也有其独特的作用。这些方法均利用了地震波的动力学属性特征(振幅、频率、相位、极性、波形等)或地震数据在时间、空间域分布的突变性、差异性、非线性特征、统计特征等去反映同一目标——缝洞发育带的空间分布。这较单一地利用地震波的运动学特征(波的传播速度、走时、时差等)在解释结果的唯一性和分辨率等方面有较大的提高。

③关于济阳坳陷典型古潜山缝洞发育带的分布规律问题。

a. GQ2 古潜山缝洞带的空间分布特征。

第一,GQ2 古潜山裂缝带的展布具有明显的方向性,受北西向和北东向两组局部断裂控制,二者近于垂直,且北西向的裂缝要比北东向的裂缝带发育早。在纵向上,裂缝带的分布也具有显著的非均质性,在潜山顶界面,主要发育北西向的裂缝带,而随深度的增加,北东向裂缝带逐渐增多,规模扩大,与北西向裂缝共存。古岩溶作用也具有选择性,以北西向的早期裂缝方向为主。总体上,北西向发育的裂缝强于北东向发育的裂缝,且以岩溶作用为主。

第二,GQ2 古潜山裂缝带的平面展布宏观上受晚期构造运动的影响,呈北东向延伸;微观上受早期构造运动和古岩溶作用的影响而呈北西向展布。裂缝发育区主要集中分布在古岩溶斜坡,而岩溶高地和岩溶洼地稍差。但从总体上看,该区无论是构造裂缝,还是岩溶缝洞都较为发育,因此,从储层的角度来说,具有有利的储集空间。而该区位于广饶潜山带,紧临牛庄凹陷,牛庄凹陷及南部斜坡沙四段生油岩都具有较好的生油能力,而且以潜山不整合面作为其运移通道,由此油源也比较充足。问题的关键是盖层和埋深。结合该区目前勘探和开发的实际,我们认为处在高构造部位的草古(CG)122 井裂缝发育带顶段之下,且又在较低部位的草古124 井裂缝发育带底段之上的两组裂缝带交叉的岩溶斜坡是该区最有利的勘探区块。此外,古地貌时差图的形态与构造图的形态基本吻合。振幅强弱能基本反映裂缝的发育情况和含油量的多少。

b. CB 古潜山裂缝发育带的空间分布特征。

CB30 井区古潜山裂缝发育区主要集中在东西向造山大断裂带之间,总体上呈北东向展布,局部也有北西向展布。裂缝发育带主要特征是沿断层分布,如 CB302 井西南部一带夹在两条大断裂之间,裂缝发育。在平面上,裂缝分布具有不均匀性,主要分布在 CB303 井区块和 CB302 井区块,呈块呈带分布,且越往南越发育,裂缝发育程度与构造位置的高低也不完全一致。CB303 东北一带,其高程比 CFD30 -1 -1T 井和 CFD30 -1 -1B 井所在片区的低,还处于断层的下降盘,但裂缝却较为发育。在纵向上,裂缝集中发育在潜山面下 270m 范围内,270m 以下分布范围相对零星。裂缝发育程度总体上随埋藏深度增大而降低。

c. NH 古潜山风化面和裂缝发育带的分布特征。

通过精细解释和参数处理,发现潜山内幕发育一条较大的古断层,其顶面由于风化剥蚀而无断层显示。此断层走向 NE,倾向 SE,基本斜穿整个研究区。断层性质由于钻井太少无法确定,对此给出了两种地质动态模型进行解释,对后期深入研究有一定的参考意义。据此对陈(CH)34 井寒武系古残丘(或所谓的飞来峰)的形成进行了地质演化解释。此类古断层的存在对油气的成藏和破坏作用有待以后进一步研究。

通过多种参数处理分析认为,NH 潜山顶面(0~60m 左右)缝洞主要发育在研究区南北两侧,以北部为主。缝洞发育区主要呈南北向条带分布,且与古河流水系有密切的联系:南北向

条带正是古河流间的山脊或山梁,为风化淋滤主要集中区,因而缝洞发育。而古河流在研究区中部有汇聚迹象,因沉积物沉淀而充填缝洞,因而缝洞发育程度差。NH 潜山内幕缝洞主要发育在研究区北部,往南减弱,平面上多呈南北向条带,靠近古断层附近多呈北东向分布,顺断层发育,说明古断裂对缝洞的展布有控制作用。潜山顶面和内幕多方法检测结果的对比表明,NH 古潜山缝洞发育带在横向和纵向上的分布具有严重的不均匀性,其空间分布特征需要更细致地分析和解释。

第二章 碳酸盐岩潜山储层缝洞带地震预测的物理地质基础

潜山系指埋藏在地下的山(buried hill)。古潜山一般曾出露地表,经受过风化、剥蚀和淋滤等地质作用,再被后期的新地层所覆盖。在潜山地层中发现的油气藏称为潜山油藏。

第一节 碳酸盐岩潜山缝洞油气储层的一般地质特征

一、构造

在各地质发展阶段,老地层要经受多期地质构造运动的抬升、褶皱、断裂、推覆、挤压和拉张等变动,使得现今构造被不同期次、不同方向、不同性质构造运动所改造而变得复杂,有的已支离破碎,形态各异。且断层组系多、性质复杂。

二、地层

由于不同时期的断陷、沉积、抬升剥蚀,使不同断块内地层层系、厚度、产状各不相同,给地层的横向对比造成了很大的困难。

三、溶蚀

由于古潜山储层经历了长时间的风化剥蚀、淡水淋滤,形成了很多大小不等的溶蚀洞和高角度的缝,造成地层介质纵横向极强的不均匀性。

四、油气藏的储盖组合

长期的构造运动和风化剥蚀使古潜山顶面出露的地层岩性不同,有时盖层也不同,造成对油气的封堵程度产生差异。断层和地层岩性尖灭有可能成为侧向封堵的有利条件,但也有可能成为油气流失的通道。古潜山储层内部溶蚀缝洞不发育的致密岩体有时可成为溶蚀缝洞油藏的局部封堵条件。

五、裂缝的多尺度性

对岩层中流体的赋存和运移有意义的裂缝、孔隙、溶蚀孔洞可视为具有不同纵横比(r)的广义裂缝。纵横比指裂缝张开的宽度与其延伸的长度之比。孔隙、孔洞的 r 接近于1,裂纹、层理、断裂的 r 则远小于1。因此, r 也是孔、洞、缝形状的一种简化表示。广义裂缝(或简称为裂缝)是多尺度的,小的很小(nm , μm 级),大的很大(km 级)。对流体赋存和运移有意义的尺度可粗分为矿物尺度、岩石尺度、地层尺度和地质尺度。

矿物尺度指穿过矿物颗粒的裂纹、各矿物颗粒之间的孔隙、颗粒胶结物之间的裂隙等。矿物级的裂缝一般很小(nm 至 μm 级),肉眼不易分辨,但对流体的赋存、渗透、运移有意义。

岩石尺度除包含矿物级的裂缝之外,还包括穿过不同矿物之间的较长、较宽的裂纹和溶蚀孔洞(mm至cm),在岩石标本和钻井岩心中可用肉眼识别。

地层(或岩体)尺度含不同岩石的组合、岩石之间的结构面(层理,纹理)和穿过地层的小断裂、溶蚀洞穴等(cm至m级)。

地质尺度含较大的断裂、地层之间的间断面、不整合面和大型溶洞、暗河等(m级至km级)。

六、垂直或高角度裂缝的广泛性

理论和大量的实际资料证明,对油气成藏有意义的裂缝多数是垂直的或高角度的定向裂缝。图2-1说明,水平应力和倾斜应力均可产生高角度裂缝。S. Crampin(2003)指出,垂直应力加泊松效应可产生矿物尺度的垂直定向裂缝。图2-2为矿物尺度垂直定向缝形成的示意图,在垂直应力不断增加的情况下,水平缝逐渐闭合,垂直缝的张开度不断加大,形成矿物颗粒边缘之间的垂直定向裂缝。S. Crampin认为,这类定向缝在上地幔到地壳的范围内都可能存在,对天然地震的孕育和油气的勘探开发均有实际意义。图2-3是岩石尺度的裂缝网络。如果在此网络中的右上角取一方块,在垂直定向应力作用下,会形成岩石尺度的垂直定向裂缝,如图2-4所示。上述例子说明,无论在微观尺度还是宏观尺度上,无论从水平应力还是垂直应力出发,均可形成垂直定向裂缝。因此我们下面的研究重点将集中在垂直定向裂缝系统或垂直定向裂缝发育带的识别和预测方面。

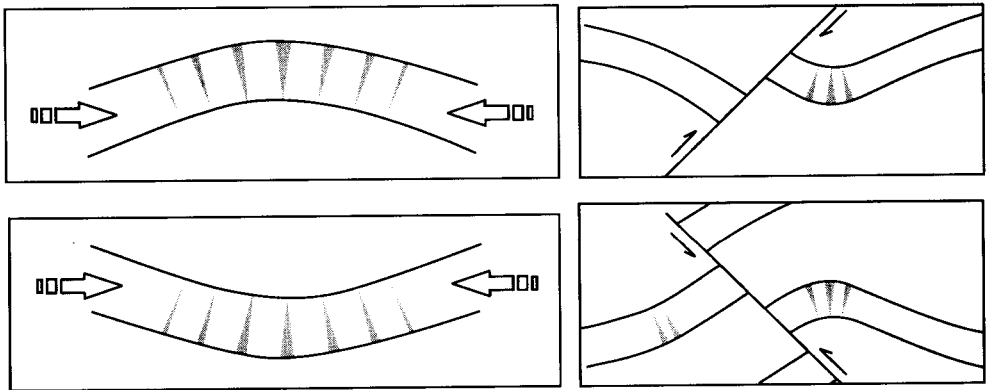


图2-1 地应力(箭头方向)产生的高角度裂缝
视裂缝张开度和延伸范围大小可能是地层尺度以上的裂缝

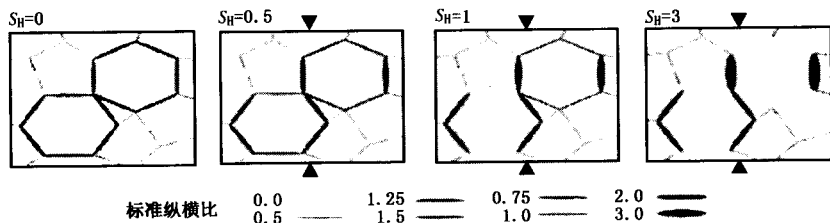


图2-2 矿物尺度的垂直定向裂缝(S. Crampin的定向应力流体饱和和顺服粒缘裂缝)模型
应力 $S_H=0$ 时,矿物颗粒边缘的裂纹呈自然分布; $S_H=0.5$ 时,颗粒间的水平裂纹和小角度裂纹开始闭合,大角度裂纹开裂程度加大; $S_H=1$ 时,水平裂纹进一步闭合,垂直裂纹进一步开裂,到达临界稳定状态,并形成定向(垂直方向)顺服粒缘临界裂缝系统;应力 $S_H=3$ 时,超过临界状态,岩石将沿垂向破裂