

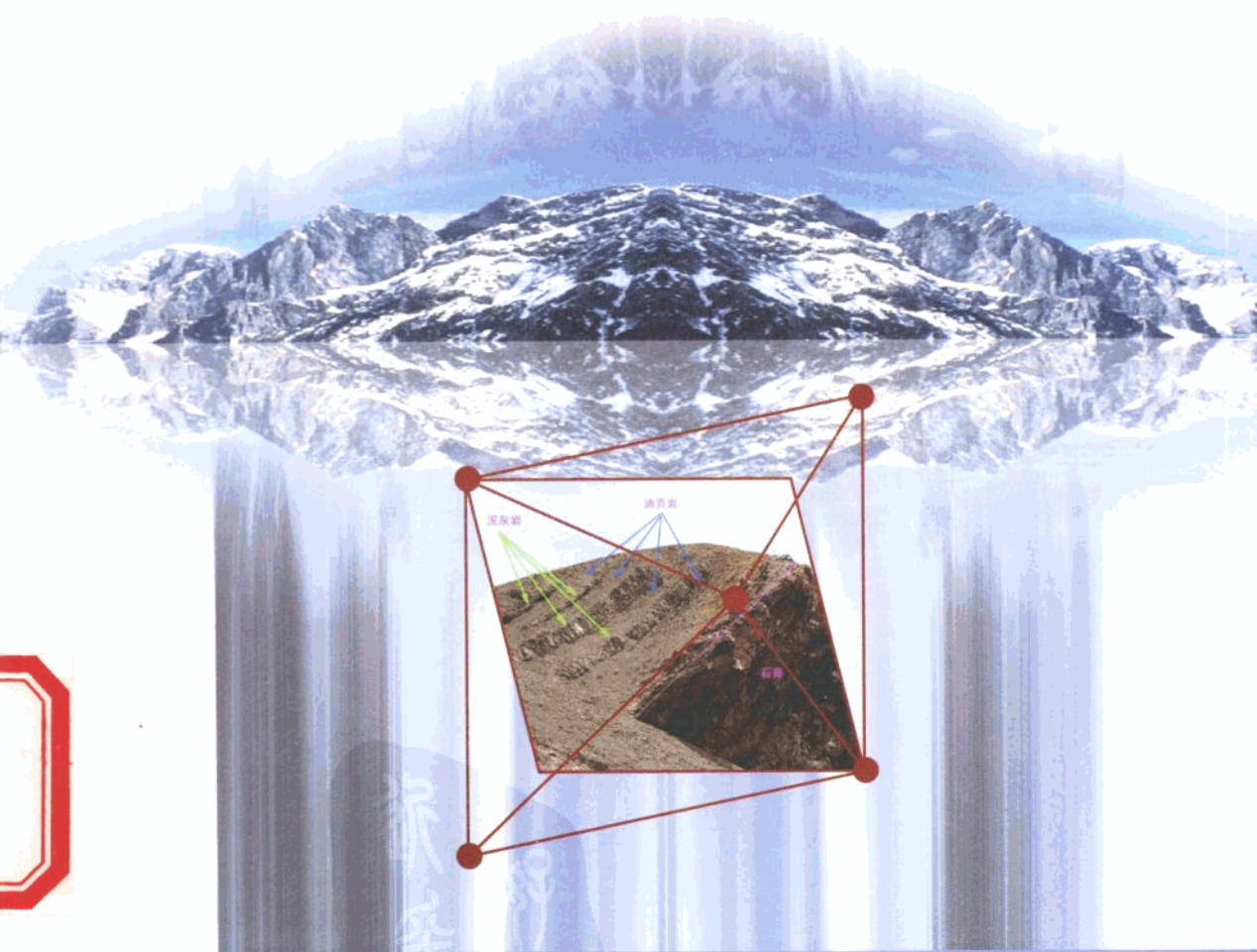
中国地质大学出版社
中国地质大学优秀青年教师资助计划
油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金

联合资助

泥岩裂缝油气藏 地质模型与成因机制

——以河口地区沙三段泥岩裂缝油气藏为例

李琦 康仁华 刘魁元 邵素薇 著



中国地质大学出版社

PDF

作者简介:

李琦:中国地质大学,副教授。1992年毕业于成都地质学院,1999年获成都理工大学理学博士学位,1999—2001年进入中国地质大学(北京)和胜利石油管理局博士后科研工作站进行博士后研究,曾任胜利油田有限公司河口采油厂副总地质师。长期从事油气勘探开发、海洋地质的教学和科研工作,负责完成科研项目9项,发表相关学术论文26篇。

康仁华:地质地球物理学家,中国石化胜利油田有限公司河口采油厂副厂长,总地质师。1982年获华东石油大学物探专业学士学位,2001年5月获中国科学院地质与地球物理所地质学博士学位,长期从事油气勘探开发生产工作。

刘魁元:地质地球物理学家,中国石化胜利油田有限公司河口采油厂副总地质师。1988年获石油大学物探专业学士学位,2002年8月获中国科学院地质与地球物理所地质学博士学位,长期从事油气勘探开发生产工作。

前 言

泥岩裂缝油气藏的研究目前是石油工业界研究的热点问题之一,随着油田勘探程度的不断提高,泥岩油气藏将成为今后油气勘探的一个重要领域。本书正是选择这一具有理论前瞻性和应用潜力的难题进行深入研究和探索的研究成果。

笔者从理论上阐明控制泥岩裂缝发育的地质背景,并通过构造模拟试验分析应力场对裂缝动态控制关系;利用先进的测试试验技术,对富烃源岩层段进行微观模型研究和裂缝介质中流体运移聚集模拟试验,阐述了泥岩裂缝油气藏的形成机制与成因模式,建立综合地质模型。依据三维多波正演模拟技术和地震波对泥岩裂缝油气藏强非均质性的响应特征,利用全三维地震资料预测裂缝发育的方位和密度,进而检测泥岩裂缝油气藏,从而在研究方法上有创新突破。

本书是在李琦博士的博士后报告基础上编写而成的,康仁华(胜利油田有限公司)、刘魁元(胜利油田有限公司)和邵素薇等参与了本书部分章节的编写工作,第八章和第六章引用了部分与北京大学沈凤教授和西北大学张金功教授合作的科研成果,在此一并表示感谢。限于编写人员的水平及所掌握的研究手段,错误与不当之处在所难免,希望广大读者批评指正。

本书的出版得到了中国地质大学出版基金和中国地质大学优秀青年教师资助计划(CUGQNL0302)以及油气藏地质及开发工程国家重点实验室基金(PLC9912)资助。

笔 者

2004年5月

目 录

第一章 泥岩裂缝油气藏研究概述	(1)
第一节 研究现状	(1)
第二节 相关理论与研究进展	(3)
第三节 胜利油田泥岩裂缝油气藏分布	(4)
第二章 地质背景与泥岩裂缝描述	(6)
第一节 地质背景	(6)
第二节 泥岩裂缝描述	(9)
第三节 裂缝发育控制因素	(17)
第三章 泥岩裂缝形成的构造背景	(19)
第一节 构造发育特性	(19)
第二节 应力场演化特征	(21)
第三节 构造模拟实验	(23)
第四节 构造对裂缝发育的控制作用	(27)
第四章 泥岩裂缝的沉积学研究	(30)
第一节 泥岩岩石学特征	(30)
第二节 层序地层格架	(35)
第三节 沙三段地层沉积学特征	(39)
第四节 成岩作用特征	(43)
第五章 异常流体压力与泥岩裂缝油气藏	(46)
第一节 泥岩压实与泥岩裂缝形成	(46)
第二节 泥岩生排烃与裂缝形成	(48)
第三节 泥岩异常高压带的油气生成和排出特征	(51)
第四节 异常高压与裂缝的关系	(54)
第六章 泥岩裂缝油气藏成藏机制	(56)
第一节 泥岩裂缝油气藏的生储盖特征	(56)
第二节 泥岩裂缝油气藏流体运移聚集模拟实验	(57)
第三节 泥岩裂缝含油气系统特征	(63)
第四节 泥岩裂缝油气藏成藏机制及成因模式	(64)

第七章 泥岩裂缝油气藏地质模型	(69)
第一节 地层格架模型	(69)
第二节 构造模型	(70)
第三节 沉积模型	(71)
第四节 成岩模型	(72)
第五节 异常压力模型	(72)
第六节 流体地化模型	(73)
第八章 三维多波地震理论模拟与数据处理	(74)
第一节 泥岩裂缝储层类型与裂缝储层岩石物性理论模拟	(74)
第二节 全三维数据处理及分析	(86)
结 论	(90)
参考文献	(91)
图 版	

第一章 泥岩裂缝油气藏研究概述

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。

第一节 研究现状

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(表 1-1)。

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: 954m ³ /d 可采储量 (0.5~0.8) 亿 m ³ 地质储量 (3.5~4) 亿 m ³	裂缝渗透率 (1~3) × 10 ⁻³ μm ² 基质渗透率 0.1 × 10 ⁻³ μm ²	背斜, 伴生气
美国阿巴拉契亚盆地	灰色、灰绿色和黑色页岩	泥盆系页岩	天然气可采储量 (24~31) × 10 ¹² m ³ 地质储量 (0.7~2.2) × 10 ¹² m ³	孔隙度 4% 基质渗透率 0.15 × 10 ⁻³ μm 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: 2 700~3 000m 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	

由于泥岩裂缝油气藏有着特殊的成因机制和成藏条件,储层空间分布非均质性极强,常规勘探开发工艺应用效果较差,是目前急需解决的技术难题,此类研究关键在于裂缝系统的准确预测。

AAPG 2001 年会共有 23 篇关于裂缝油气藏预测和表征的研究论文发表,关于裂缝油气藏研究的相关会议与专题讲座也是目前学术交流的热点。裂缝油气藏的表征和预测也是目前油气勘探领域世界研究热点和难题。

美国主要的含油气盆地大都有泥岩油气藏发现。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 107.54 亿 m^3 天然气(GRI,2001)。美国泥岩天然气藏的产量从 1989 年的 42 亿 m^3 增长到 1999 年的 107.54 亿 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。

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(张金功,1996),反映出我国泥质岩类油气藏勘探的广阔前景(图 1-1)。

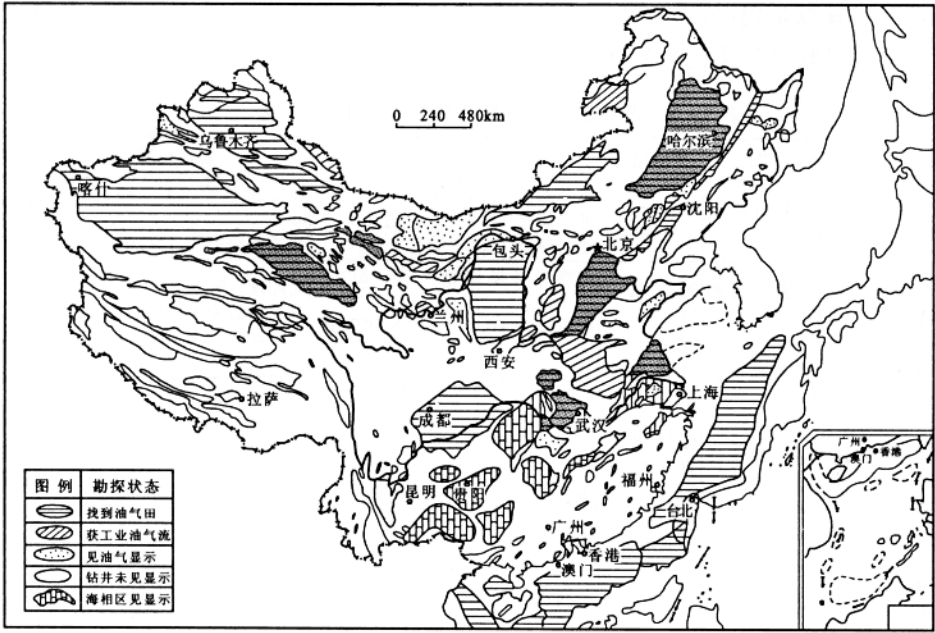


图 1-1 我国已发现泥岩裂缝油气藏分布图(李琦,2000)①

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(图 1-2)。

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
地层		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 玉门组	七个泉组
	上新统	泰康组	明化镇组	明化镇组					
	中新统	大安组	馆陶组	馆陶组	上寺组	广华寺组	盐城组	疏勒河组 白杨河组	狮子沟组 油砂山组 上干柴沟组
	渐新统	依安组	东营组 沙河一段 沙河二段 沙河街组 四段	东营组 沙河一段 沙河二段 沙河街组 四段	廖庄组 核一段 桃园二段 三段 四段	荆河镇组 潜一段 江二段 组三段 四段	三垛组 戴南组 四一段 二段 三段 一段	火烧沟组	下干柴沟组
	始古新统		孔店组	孔店组	大仓房组	荆沙组	阜宁组		
					玉皇顶组	新沟咀组	泰州组		
						渔洋或江陵组	赤山-浦口组		
	上统	明水组 四方台组 嫩江组 姚家组 青山口组 泉头组 杏树堡组 营城组 沙河子组 戴宝-流南组 白城组	(红层)			五龙组	葛村组	新民堡群 中沟组 下沟组	犬牙沟组
	下统					石门组			
	上统					重庆组			
	中统					自流井组			
中 生 界	白垩系								
	侏罗系								
中 生 界	白垩系								
	侏罗系								
备注：泥岩裂缝油气藏并钻井		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 1-2 我国泥岩裂缝油气藏发育地层对比(李琦,2000)

第二节 相关理论与研究进展

泥岩裂缝油气藏的研究涉及较多石油地质的基础问题,包括岩石中裂缝的形成演化、泥质岩的生排烃问题、油气初次运移、异常压力带、区域构造裂缝的形成以及应力场对裂缝油气藏的影响与改造等重要研究内容。

同时为了研究裂缝发育带的展布方向、密度以及大小等参数,全三维地震检测技术、成像测井、定向井、水平井等勘探技术的应用也取得巨大进展。

目前国内外对泥岩裂缝的预测方法还未形成系统的研究技术和有效的研究手段,概括起来主要有地质研究、实验与模拟研究以及地球物理勘探等方法。

1. 地质研究方法

包括露头区地质调查和钻井岩心的统计研究,如裂缝间距指数法(Narr,1986,1991)、薄片分析法(E. M. Cmexoba,1962;T. D. Van Golf - Racht, 1982;R. A. Nelson, 1985)及一些数理统计方法等。

储层裂缝预测的构造地质方法主要有曲率分析方法。岩层受构造力作用时发生形变,当形变量达到或超过其形变极限产生破裂形成裂缝,发生破裂时的曲率值定义为破裂临界曲率值。临界曲率值的大小与岩性和压实固结程度有关。在其他条件相同时,裂缝密度与岩层曲率呈正比。因此,构造曲率变化大的部位是裂缝发育的最佳部位,其次是断鼻、褶皱和断块轴向交点部位。

Murray(1968)用简单的几何方法导出了褶皱(小挠度)的曲率与构造裂缝孔隙度的定量

关系,在构造裂缝预测中有着广泛的影响。随后,国内外一些学者相继提出以 Murray 方法为基础的构造裂缝孔隙度的方法(Macquillan,1971;曾锦光等,1982,1989)。然而曲率法或主曲率法认为弯曲岩层构造裂缝孔隙度只与曲率有关,但是褶皱岩层曲率相同,深度不同时,构造裂缝孔隙度有明显差别。实验表明,裂缝宽度随围压的增大迅速衰减,这些方法忽视了影响构造裂缝孔隙度的重要因素——围压的有效影响。

定性研究褶皱裂缝分布规律较为成熟,基本能够确定由于岩层弯曲变形产生的裂缝发育区,但对于宽缓向斜或区域性单斜,常规的构造地质分析无法解决其构造裂缝的分布规律。尤其对研究区内缓坡带的泥岩裂缝预测,针对性较差。

2. 实验与模拟研究方法

包括岩石力学试验、光弹模拟、数值模拟(Murray,1968;曾锦光,1982;Ramstad Quiblier,1977)等试验技术预测裂缝发育特征。

通常认为天然裂缝是由构造应力产生的,构造裂缝的形成取决于构造形成时期的应力分布,因此裂缝分布规律的研究归结为历史构造应力场的反演问题。这是一个具有多解性的复杂问题,由于边界条件和地质体的力学性质等均属于未知,因此只有借助于适当的力学模型来模拟分析,反复验证,逐步逼近真实的情况。

对构造应力场的分析目前应用较多的是有限单元法。其基本原理是以岩石断裂力学和褶皱形变力学为基础,以工区断裂分布和其构造形迹为依据,以非线性有限元技术为手段来反演工区在历次构造运动中产生的应力场,将地应力场数据模拟结果与格里菲斯或库仑准则结合,可以较准确地进行裂缝预测和评价。

3. 地球物理勘探技术方法

主要包括测井与地震识别裂缝的新技术方法。

常规的声波测井、放射性测井及其组合方法,以及近年来新发展的裂缝识别测井、斯通利波测井、微电阻率扫描成像测井、声波电视测井、横波测井、核磁共振测井及全波列测井等,这些新技术都可以较好地确定裂缝分布的某一特定参数,但存在程度不同的多解性和局限性。

近年来将 VSP 用于裂缝发育段的识别和横波勘探,取得较好效果。地震资料的特殊处理以及全三维地震检测技术也是裂缝油气藏研究的一个重要方面,可以对裂缝网络的发育特征进行精细的标定,预测裂缝发育的方向和密度。特殊的物探技术方法都具有投入成本较大的特点,不易推广。

此外还有试井分析技术等开发措施,上述各种方法技术针对泥岩裂缝油气藏研究虽然各有所长,但均存在着程度不等的局限性和多解性,因此需要相互配合。

本次研究侧重于地质和实验与模拟研究,结合地球物理勘探技术对泥岩裂缝油气藏的地质模型和成因机制进行深入的研究。

第三节 胜利油田泥岩裂缝油气藏分布

从 1960 年以来,胜利油田逐年都有泥岩裂缝油气藏发现,到 1990 年底累计有 368 口钻井在泥质岩地层中见油气显示(图 1-3),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 91.3t/d,单井累计产油可达到 13 605t。

胜利油田几个主要的凹陷均有泥质岩油气藏发现,以沾化和东营凹陷为最多(图 1-4)。

整个济阳坳陷的最有利评价区泥质岩资源量累计为 $1.49 \times 10^8 \text{t}$, 其中沾化凹陷泥质岩资源量可达 $0.69 \times 10^8 \text{t}$, 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 (杨申铤, 董冬等, 1993)。

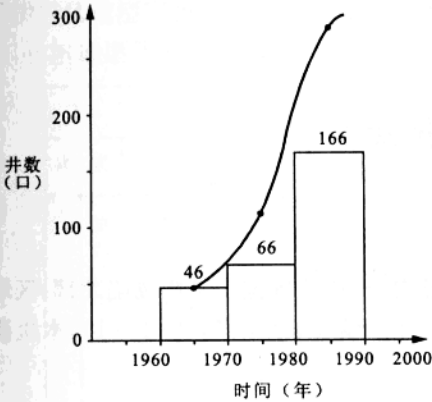


图 1-3 胜利油田泥岩裂缝井发现情况

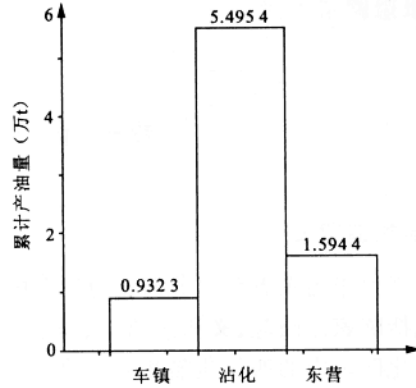


图 1-4 胜利油田主要凹陷泥岩累计产油量

河口地区是济阳坳陷泥岩裂缝油气藏最发育的地区之一。至 1999 年底, 该地区共有 180 多口探井在泥岩地层中见油气显示, 24 口探井获工业油流。由于泥岩裂缝油气藏勘探难度较大, 与其他油藏类型相比, 目前发现的油藏数量少、规模小, 但从勘探实际情况来看, 各种类型泥质岩中均可发育泥岩裂缝油气藏, 在深度上除发育于 3 500m 以上的中深层外, 还可发育于 3 500m 以下的深层, 这一切都表明河口地区泥岩裂缝油气藏具有巨大的勘探潜力。

第二章 地质背景与泥岩裂缝描述

第一节 地质背景

一、区域构造背景

河口地区位于山东省北部黄河三角洲上的东营市境内,构造位置位于济阳坳陷北部,区域构造单元包括陈家庄凸起、义和庄凸起、埕子口凸起和沾化凹陷、车镇凹陷(图 2-1),本次研究重点为沾化凹陷内的四扣洼陷和罗西地区。

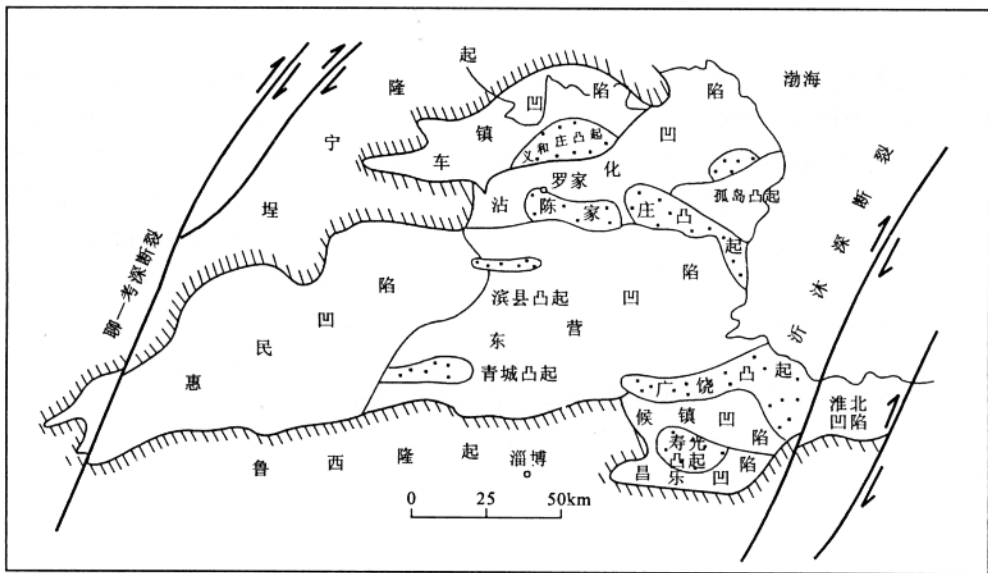


图 2-1 研究区构造位置图 ①

四扣洼陷位于沾化凹陷的西北部,为一个西北断、东南超的典型箕状洼陷,罗西地区位于洼陷的东南斜坡,发育了一系列的北东向及近东西向盆倾断层。研究区形成于燕山运动二幕块段运动后,下第三系早期断陷盆地持续发展,并伴生一系列同生断层,同时开始湖盆充填沉积。

盆地周围的断层孤北和埕南为一级断层(北东走向,落差 500~700m),义东和孤西为次级断层(北北东和北北西走向),区内还发育数条次级同生断层,多为东西走向,落差 50~20m,为洼陷内的分区断层,这些边界断层和分区断层对区内岩性分布控制和油气聚集均起控制作用。义和庄、陈家庄、孤岛、埕东等凸起向湖盆提供碎屑物质。

① 胜利石油管理局地质研究院,1995

二、地层发育特征及湖盆演化

研究区内沉积地层由两大部分组成：古生界以前的老地层构成湖盆的基底，中、新生界地层构成盆地型沉积。自下而上第三系地层主要发育沙河街组、东营组和馆陶组地层(图 2-2)，各组地层特征如下：

地 层					地层符号	示意剖面	地层厚度(m)	标准反射层	岩 性 特 征	沉积环境
界	系	统	组	段						
新 生 界	第四系	全新统	平原组		Q		250 ~350		灰黄色泥岩夹粉砂岩	泛滥平原
			上明镇组		Nm		300 ~800	T ₄	棕黄、灰色泥岩夹粉砂岩	河流、泛滥平原
		中新统	馆陶组		Ng		400 ~700	T ₁	上段：灰白色砂岩夹红色、灰绿色泥岩 下段：灰白色块状含砾砂岩夹红色、灰绿色泥岩	河流、泛滥平原
			东营组		Ed		400 ~600		上部含砾砂岩、砂岩夹灰色灰绿色泥岩 下部灰色泥岩夹薄层砂岩	浅湖、扇三然洲
	第三系	渐新统	沙一段		Es ₁		200 ~300		灰色油页岩、泥岩，底部夹白云岩、生物灰岩	半深湖
					Es ₂		80 ~120	T ₃	灰色、紫红色泥岩夹砂岩	滨浅湖、扇三角洲
					Es ₃		500 ~700		深灰色油页岩、油泥岩、泥岩局部夹薄层砂岩	深湖—半深湖、水下扇浊积扇
		始新统	沙河街组	沙四上段	Es ₄ ^上		100 ~300	T ₄	深灰色泥岩、灰岩和膏岩，局部为砂砾岩	半封闭咸化泻湖、水下冲积扇
				沙四下段	Es ₄ ^下		>1 000		紫红色、灰色泥岩夹砂岩、含砾砂岩局部发育薄层膏岩	山麓冲积、洪积
								Tg		
	中生界	侏罗统—白垩统			J ₃ -K		>2 000		红色、杂色砂砾岩夹泥岩，上部见大量中酸性喷出岩	火山喷发、山麓冲积、洪积
					J ₁₊₂		250 ~350	Tg	灰色砂砾岩夹暗红色泥岩，底部发育厚煤层	沼泽—河流
古 生 界	石炭—二叠系				C-P		300 ~600	Tg ₁	灰白色石英砂岩夹泥岩和薄层灰岩，下部发育煤层	海陆交互、河流
					Є-O		1 000 ~1 200	Tg ₂	灰色碳酸盐岩夹页岩	广海—局限海

图 2-2 河口地区地层发育简图^①

① 胜利石油管理局地质研究院，1995

沙四段上部主要为半闭塞的泻湖环境,地层以灰质泥岩、灰岩与薄层砂岩互层为主,湖盆中心发育膏盐沉积,在湖岸带常有生物灰岩、藻灰岩分布,在斜坡带相变为砾状砂岩或含砾砂岩。

沙三段为深湖—半深湖环境,以灰色泥岩、油页岩、油泥岩为主,与沙四段为连续沉积。沙三段分上、中、下三段,地层总厚度 350~1 400m,与上覆沙二段是不整合关系。

沙三下湖盆进入稳定发展期,湖底广阔,以静水沉积为主。发育第三、四套油页岩,在第三套油页岩顶发育一套灰色低阻泥岩,称为“稳定泥岩段”;沙三中的下部以第二套油页岩为主,沙三中的上部出现砂岩和泥岩间互沉积;沙三上部随湖域退缩,地层分布范围自下而上也相应缺失。

沙二段湖盆中心以暗色泥岩及白云质、灰质泥岩为主。在湖盆斜坡带以厚层砂岩、砂砾岩体为主,地层厚度不大,约 100~190m。与沙一段呈不整合关系。

沙一段是深水—半深水湖相还原环境,上部为灰色灰质泥岩或泥灰岩,下部为油页岩,底部常有一层生物灰岩。沉积中心四扣洼陷一带,地层厚度 50~300m,与沙二段在洼陷中心为假整合。

东营组地层主要是滨浅湖、三角洲—河流相沉积,下部以灰色泥岩、泥灰岩为主,上部以砂岩、砂砾岩为主夹泥岩互层,与下伏沙一段地层呈整合接触。地层厚度 200~900m。

馆陶组为河流相沉积,下段为厚层块状砂岩、砂砾岩,上段为砂岩与泥岩互层,砂岩颗粒相对变细,厚度 500~900m。与东营组为区域角度不整合。

从沙四、沙三、沙二段地层可见本区湖盆从形成到发展直到衰亡的一个完整过程。本区普遍缺失沙三上至沙二下地层,说明沙三末期地壳普遍抬升,湖水后退,从沙四—沙三上是一个完整的沉积旋回。从沙一段到东营组,水体再次扩大,出现半深—深湖相沉积至浅湖相泥岩,直至东营组末期,断陷湖盆逐渐填平消亡。

三、泥岩裂缝油藏分布特征

目前主要在四扣洼陷北部和东南斜坡发育泥岩裂缝油气藏,具有以下特征:

1. 地层特征

泥岩裂缝油气藏纵向上主要发育于下第三系沙三段下部和沙一段下部层位,埋深一般为 2 400~3 500m 的中深层。

2. 岩相特征

泥岩裂缝发育的主要岩性以油页岩、油泥岩为主,还包括少量变质泥岩、碳质泥岩、灰质泥岩等其他泥质岩类,裂缝发育段不同岩性呈互层状产出。

3. 岩石物性特征

泥岩储层具有特低孔、特低渗的特点。孔隙度为 0.4%~9%,平均约 1.83%,渗透率一般小于 $(0.017 \sim 73.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均约 $6.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

4. 储集层特征

泥岩储层的主要储集空间为高角度裂缝和层间裂缝。

5. 流体物性特征

沙河街组泥岩裂缝储层中的原油以轻质油为主,伴有天然气产出,原油物性很好。地面原油物性分析表明,粘度和含硫量均较低,不含水或含水少,含蜡量和凝固点较高。

6. 地层压力和温度特征

从钻井的试油结果看,泥岩裂缝钻井的日产油量较高。多具高压异常,压力系数为 1.29

~1.59,但压力释放快,压降大。早期一般能自喷,产量高,后期表现供液不足。地温梯度较高,约为 $3.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

第二节 泥岩裂缝描述

裂缝性油气藏勘探的关键在于对裂缝成因和分布规律的正确认识。评价裂缝性储集层首先要建立在对裂缝系统成因的解释上,才能够对裂缝几何形态和分布有准确的认识和可靠的预测结果(Nelson, 1985)。

综合利用显微镜薄片分析、荧光薄片分析、矿物成分分析、岩石力学测试、CT 扫描和电镜等测试技术,从成因上划分研究区内的裂缝类型,分析研究控制研究区内泥岩裂缝发育的主控地质因素。通过对裂缝的充填特征和形成期次研究,分析裂缝成因机制,建立裂缝综合地质模型,计算泥岩裂缝相关的物性参数。

一、泥岩裂缝类型划分

因研究侧重点不同,不同学者对裂缝划分提出了不同的分类标准,具代表性的有 Stearns 和 Friedman(1975)、斯麦霍夫(1985)、Nelson(1985)和 Aguilera(1998)等方案,这些分类方案分别从不同角度反映裂缝的某些特征。

按裂缝张开宽度分为巨缝(大于 100mm)、大缝($100\sim 5\text{mm}$)、中缝($5\sim 1\text{mm}$)、小缝($1\sim 0.1\text{mm}$)和微缝(小于 0.1mm);按形态分为网状缝、树枝状缝、垂直缝、斜交缝等;按裂缝倾角又可以分为高角度、低角度等裂缝。

由于裂缝分类标准不同,使用中容易产生混淆,有必要统一分类标准,便于交流。目前应用较广的是以 Nelson 为代表的地质成因分类方案。

由于成因分类方案考虑了裂缝形成的地质作用和力学作用,可以直观地反映裂缝形成时的地质环境及相应的力学环境,同时它可以将复杂的裂缝系统分解为几种简单成因的叠合,这种分解使对裂缝的描述和预测变得易于处理(Stearns 和 Friedman, 1972)。

通过对研究区钻井取心的宏观及微观描述,结合测井、物探资料和开发资料,根据裂缝的地质成因可将研究区发育的天然泥岩裂缝分为 4 大类 8 小类。为便于应用,部分裂缝类型沿用了生产中常用的命名。根据胜利油区泥岩裂缝油气藏发育特点,综合前人的研究成果,建立研究区内的天然裂缝地质分类方案(表 2-1)。

表 2-1 本地区泥岩裂缝地质成因分类(李琦, 1999)

类 型	亚 类	主要地质成因
构造裂缝	张性裂缝	局部构造作用和区域构造作用形成的裂缝 经常与断层或褶皱相伴生出现成岩裂缝矿物收缩裂缝
	剪性裂缝 挤压性裂缝	
成岩缝	成岩收缩裂缝	泥岩失水收缩、干裂或重结晶等作用形成的裂缝 页理发育的油页岩或其他沿层理面形成的顺层裂缝 由于泥岩成分不同造成差异溶蚀作用,形成溶蚀裂缝异常压力裂缝
	层间裂缝 溶蚀裂缝	
异常压力缝		异常压力作用使泥岩发生破裂形成的微裂缝
变质收缩裂缝		火成岩侵入生油岩中,泥岩被烘烤变质,冷却破裂

二、泥岩裂缝分类描述

主要利用岩心观察、薄片分析和扫描电镜,结合成像测井解释等资料,从宏观到微观对裂缝的形态、产状要素、组合形态以及充填特征进行描述。

(一) 构造裂缝

构造裂缝是指在构造应力作用下形成的裂缝系统,其方向、分布和形态可以归因于局部构造事件或与局部构造事件相伴生的断层活动。主要分布于本地区沙三段和沙一段地层中泥岩、泥灰岩层系中,岩心上看到的宏观裂缝大多是构造裂缝,薄片下也可以看到构造成因的微观裂缝。

按构造裂缝形成的力学性质,结合研究区内裂缝发育特点,大体可以分为张性裂缝、剪性裂缝和扩张裂缝等。

1. 张性裂缝

张性裂缝主要指拉张裂缝,具有位移方向与破裂面垂直并远离破裂面的特点,是在拉张应力作用下形成的。

本区泥岩类岩石中张性裂缝比较发育。一般具有下列特征:① 缝面粗糙不平,常有绕岩石或矿物颗粒而过的现象;② 裂缝产状不稳定,在岩心横切面上常呈锯齿状延伸;③ 裂缝两壁张开,常被矿物充填,充填矿物晶面垂直于裂缝面,沿有裂缝壁面向中心生长。

岩心观察的张裂缝长度为数厘米到数十厘米,裂缝面粗糙,形态变化较大,裂缝可被白色碳酸盐岩矿物或沥青质充填。义17井3190.4m近垂直岩层面的张裂缝开度为6~8mm,长约70cm,破裂面不平整,多数被完全充填或部分充填(图版I-A)。

张性裂缝的倾角分布范围较大。如新义深9井3381.50m,高角度张性裂缝的倾角在50°~80°之间,裂缝张开宽度约5mm,缝面不平整与顺层裂缝相互穿插(图版I-B)。

薄片中和扫描电镜下也可见到微观张性裂缝,常见的为近垂直于层面的张裂缝,切穿水平缝,连通顺层裂缝。如罗11井3120.00m一条切穿多条顺层缝的张裂缝,张开度约为30μm,完全被方解石等次生矿物充填(图版I-C)。如大94井2360.06m张裂缝,长度为1.5cm,张开度为30μm,溶蚀后扩大为80μm,有烃类充填。

张性裂缝具后期溶蚀和部分充填特征,有时含烃类,说明与烃类同期形成或早于烃类产生。如大94井2360.06m,一张裂缝局部被溶蚀扩大,张开度从30μm到80μm,有烃类充填。新郭3井2838.20m的顺层张裂缝先被碳酸盐沿缝壁栉壳状充填后烃类又注入,与层面低角度斜交的裂缝终止于顺层缝而未被充填。

2. 剪切裂缝

区内剪切裂缝最为发育,主要有以下特征:① 常切过岩石颗粒,裂缝面光滑有擦痕,甚至还有微错动现象;② 产状较稳定,组系性较强,延伸较远;③ 裂缝闭合,充填物一般较薄,充填物为碳酸盐岩矿物或油气。

裂缝倾角范围近水平到近于垂直,如大92井2663.03m岩心上,近垂直岩层面的菱形共轭剪切裂缝,缝面较粗糙,张开宽度约2mm;大92井2260.0~2266.0m裂缝,倾角70°~80°,缝长50cm左右,破裂面光滑,局部有充填物;罗67井2659.83m岩心,剪切裂缝切穿层面,倾角50°以上,张开度约2mm,缝面见小型擦痕、阶步等现象(图版I-D);新义深9井3413.00m处,5条切穿岩石层面、近于平行的剪切裂缝,裂缝倾角30°,缝面张开度较小,局部被溶蚀,未被充填。

薄片中和扫描电镜下的剪裂缝很少见,多与层面低角度斜交,一般未被充填。此类裂缝一般晚于油气的大规模运移期形成,如新郭3井2 838.20m的裂缝,平行层面,擦痕面上有石蜡。

3. 挤压性裂缝

挤压性裂缝又称扩张裂缝,是当三个主应力都为挤压状态时形成的,经常与剪切裂缝共生。

如新义深9井3 376.80m处,沿层理面裂开的挤压性裂缝,缝面凹凸不平,见残余原油(图版I-E)。新郭3井2 835m,裂缝产状比较平缓,挤压裂缝切割含油的层间裂缝,指示其形成时间较晚。从裂缝的充填情况可知,本区挤压性裂缝的发育是多期次的,可发育在生油期前后。

(二) 成岩裂缝

成岩裂缝是指泥岩在压实埋藏过程中受成岩作用影响发生破裂形成的裂缝。

成岩裂缝分布广泛,规模一般较小,以近于水平的微裂缝(缝面张开宽度小于0.15mm)为主。根据成因分为矿物收缩裂缝、溶蚀裂缝、层间页理缝三种类型。

1. 矿物收缩裂缝

泥岩在成岩过程中,泥岩收缩或矿物相变造成岩石体积减小,形成收缩裂缝。成岩收缩裂缝在泥岩层和具水平层理泥灰岩的泥质夹层中常见。

矿物收缩裂缝延伸长度不大,张开宽度一般在 $5\sim 15\mu\text{m}$,部分充填,如郭7井2 670.5m、2 671.9m,罗67井2 971.20m和大94井2 360.06m的扫描电镜下均见此类裂缝。

2. 溶蚀裂缝

泥岩不同纹层间矿物成分不同或矿物颗粒排列方向的差异,沿纹理面差异性溶蚀是原生裂隙扩大或形成新的裂缝孔洞。溶蚀裂缝在互层状灰质泥岩中分布广泛,多平行于岩石层面出现(见图版I-E)。

罗67井2 962.47m,岩石薄片(2.5×20 倍)中可见一条明显的溶蚀裂缝,裂缝张开度约0.75mm,延伸长度超过10mm,被沥青质充填,基本平行于岩石层面。新义深9井CT扫描照片表明沿层理方向发育大量裂缝,缝面宽度为 $0.05\sim 0.20\text{mm}$,大部分为溶蚀裂缝。

3. 层间页理缝

普遍出现于页理发育的泥页岩中,主要与上覆岩层的剥蚀卸载作用有关,在地下高压状态下张开度较小。

如郭7井2 670.7m,页理缝非常发育,多数被完全充填,张开度为 $20\mu\text{m}$ 左右,一端与高角度张裂缝连通(图版I-F)。新义深9井3 380.40m处见到张开度约为 $30\mu\text{m}$ 的层间缝(电镜,400 $\times$)。

新义深9井3 383.15m平行层面的裂缝,张开度约 $1\sim 3\text{mm}$,缝面平整并被沥青充填。

(三) 异常压力裂缝

异常压力裂缝是指地层中流体压力作用于泥岩层,当压力突破岩石破裂强度时形成的裂缝,多形成于有机质演化过程中。异常压力缝是油气初次运移的主要通道,随着压力变化间歇开启和闭合。研究区内主要发育在3 000m以下的超压带泥质岩地层中。

新义深9井3 470.9m的异常压力裂缝,缝面不规则,多被后期的泥质充填(图版II-B)。罗67井2 902.0m处异常压力裂缝,产状呈不稳定的树枝状、脉状,并被有机质或沥青质浸染。

(四) 变质收缩裂缝

地下高温岩浆上涌,沿层理等结构薄弱面侵入到泥岩地层中,对围岩进行烘烤、交代,发生

热接触变质作用,泥岩转化为碳质泥岩和变质泥岩,随温度降低,碳质泥岩、变质泥岩体积收缩,形成变质收缩裂缝。

罗 151、罗 152 井的岩心观察,宏观裂缝以水平方向为主,基本平行于原始泥岩的层理面,微裂缝方向不规则。

从统计结果来看,无论是岩心上的宏观裂缝还是薄片及扫描电镜下的微观裂缝,构造缝在以上 4 种缝中都占绝对优势,是主要的储集空间和渗流通道,其次是成岩裂缝。异常压力缝发育在特定的超压环境下,变质收缩裂缝主要出现在侵入岩周围的泥质生油岩中。

三、裂缝组合特征

单条裂缝难以形成有效的储集空间,只有裂缝的有效组合形成裂缝系统网络,才对油气聚集成藏有意义,因而裂缝组合形态以及裂缝充填性质研究对于油气藏预测十分重要。

1. 裂缝的平面组合

不同方向构造裂缝的平面构型主要有三种表现:

① 同一组裂缝疏密相间或成带展布。

② 平面上呈现大角度交错的裂缝,可能是同一构造事件的共轭剪节理。同一种充填特征的裂缝代表一个构造幕。

③ 两组裂缝相对镜像排列的共轭裂缝,说明受近水平应力作用形成裂缝。

2. 裂缝的剖面组合构型

剖面上,裂缝组合形式表现为以下 6 种情况:

① 叠瓦状排列:由一组产状一致的裂缝密集排列而成。

② 以铅垂线对称的共轭裂缝:共轭的两组裂缝具有同样的充填特征,表明为同步活动,如新郭 3 井 1 $\frac{5}{36}$ 岩心,两条相背倾斜的裂缝,先被方解石充填,后又被油质浸润,说明这两条裂缝活动是同步的;若共轭的两组裂缝并非同等发育,反映岩块的受力方向近水平或近于垂直,新郭 3 井 1 $\frac{4}{36}$ 岩心块以岩心轴向大体对称的两组裂缝,在其共轭的菱形长对角线方向上发育张裂缝,表明岩体受到了垂直方向的挤压应力形成剪切裂缝,伴生张裂缝。

③ 陡-缓裂缝组合:同一期次构造形成的两组裂缝,一组近于直立且发育较好,裂缝的张开度较大;另一组裂缝较缓,发育程度较差,张开度较小,但仍可被油质浸润。

这类组合多出现在一定规模的正断层附近,由于上盘岩层下滑产生“X”形微裂缝,岩层相对扭动的局部应力场转变,使其中一组转化为近于直立的张扭性裂缝,另一组转化成较平缓的压扭性裂缝,前者成为油气储存和运移的良好场地。

④ 羽状裂缝组合:在一条主干压扭性裂缝的一侧或两侧由于两盘相对位移,产生次级派生张裂缝。如新郭 3 井 1 $\frac{1}{36}$ 岩心上见到的一条倾角约 65° 的波状裂缝,早期活动控制了碳酸盐岩脉的充填,后期再次活动时上盘产生了“λ”形的派生裂缝,与主干裂缝一起被油质浸润,充填性差异反映其成因及伴生关系。

⑤ 蛇形裂缝组合:近于直立的裂缝曲折成蛇形,主要是一组张性追踪裂缝,其受力方向为上下施压,与前述几种共轭裂缝的受力方向一致,主体仍为脆性扩张破裂。

⑥ 斜“丰”字形裂缝组合:由张开度较大的陡立切层裂缝连通一组顺层裂缝构成。在层理发育的岩层中近于水平的成岩裂缝常常是良好的储油裂缝,但规模较小;当高角度张性或剪性