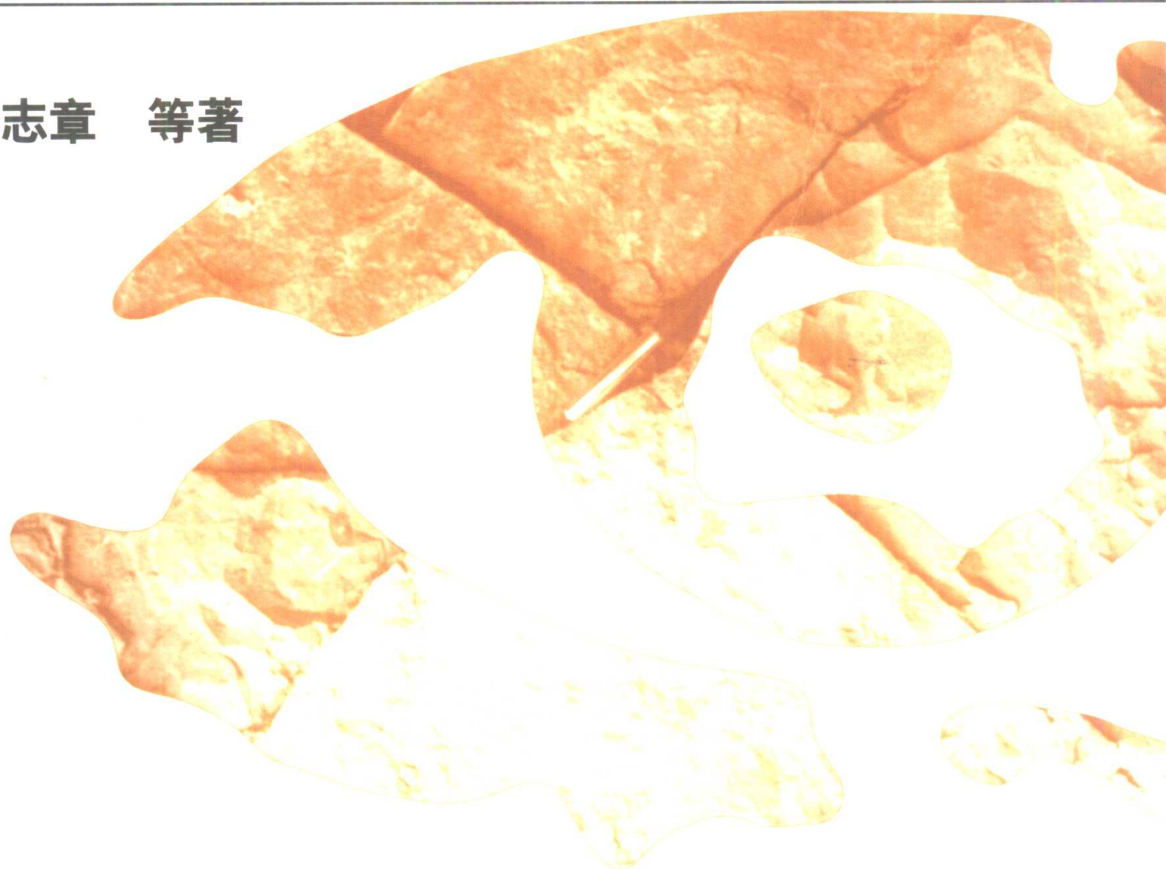


中国典型油气藏描述及预测丛书

裂缝性油藏描述及预测

王志章 等著



**FRACTURE RESERVOIR DESCRIPTION
& PREDICTION**

(北京)

130.2

88

石油工业出版社

中国典型油气藏描述及预测丛书

裂缝性油藏描述及预测

王志章 等著

王志章

2000.124

石油工业出版社

内 容 提 要

裂缝性油藏是油田勘探、开发过程中难度最大的油藏类型之一。中国西部油田裂缝性油藏丰富,进行裂缝性油藏描述及预测,无论是从中国西部还是从中国东部深层油田,均具有深远的历史意义。本书作为石油大学(北京)油藏描述与预测研究所油藏描述系列专著之一,以火烧山油田为背景,系统阐述裂缝性油藏描述的内容、流程及关键技术,旨在抛砖引玉,为中国西部油田裂缝性油藏开发提供借鉴。

本书可供科研、生产部门的石油地质、开发地质科技人员及高等院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

裂缝性油藏描述及预测/王志章等著.
北京:石油工业出版社,1999.5
(中国典型油气层描述及预测丛书)
ISBN 7-5021-2828-X

I.裂…

II.王…

III.①裂隙油气藏-油藏描述②裂隙油气藏-预测

IV.P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 65723 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北省徐水县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 11 印张 275 千字 印 1—1000

1999 年 5 月北京第 1 版 1999 年 5 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-2828-X/TE·2211

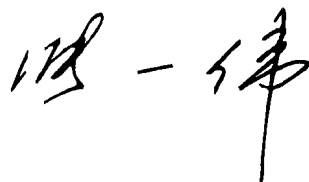
定价:20.00 元

序

油藏描述是 70 年代末开始出现, 80 年代发展起来并逐步完善的一项为勘探、开发准备的综合评价油气藏的新技术。勘探开发的实践表明, 勘探与开发工作成败的关键在于对油藏的认识是否符合客观实际, 因而, 自“七五”以来, 国内外均把油藏描述、表征及预测放在突出重要的位置并加以研究。

中国油气藏十分复杂, 多为陆相沉积, 且地质构造复杂、断块发育、非均质性强, 给油田勘探、开发带来了许多适用常规理论方法和技术所解决不了的新问题。石油大学(北京)油藏描述及预测研究所全体研究人员及其合作单位, 十余年来, 在生产实践中不断探索、创新, 历经“七五”、“八五”“九五”刻苦攻关, 逐步发展创造了一套具有中国地质特点的陆相非均质油藏描述、表征及预测的理论、技术和方法, 并在生产实践中取得了明显的经济效益和社会效益。

《中国典型油气藏描述及预测丛书》正是石油大学(北京)油藏描述与预测研究所十余年科研攻关的结晶。这套丛书包括《现代油藏描述技术》、《勘探油藏描述》、《开发油藏描述》、《复杂断块油田油藏精细描述及预测》、《砾岩油藏描述及预测》、《低幅度构造油藏描述及预测》、《裂缝性油藏描述及预测》、《碳酸盐岩油藏描述及预测》、《低渗、特低渗油藏定量表征及预测》、《特殊类型油藏描述及预测》、《开发中后期油藏参数变化规律及变化机理》、《典型气藏描述及预测》十二个分册。比较系统地著述了我国陆相油田不同勘探开发阶段, 不同油藏类型的动、静态特征及其真实的地质模型, 开创性地提出了针对陆相油藏、复杂油藏的储层岩石物理相、油藏渗流地质学、相控储层对比、相控储层预测、相控储层参数计算、相控储层随机模拟、视标准层构成及视储集空间构成等新理论、新技术、新观点。发展并完善了储层地震预测, 微分分析法、多参数法识别油气水层, 储层参数神经网络模拟及预测、剩余油形成机理及预测、裂缝性储层评价、碳酸盐岩储层表征、油藏属性参数三维建模等方面的配套技术和方法。相信它的出版, 必将会对高效地指导今后油田勘探、开发起到积极的作用。同时也会有助于广大石油科技工作者, 与在个别的学科中单独发展起来的关键技术, 聚合于一起, 进行系统的思考, 从三维空间乃至四维空间, 科学地认识油藏、管理油藏。推动我国油气田勘探、开发水平的不断提高和石油工业的发展。



1998 年 12 月

前 言

油藏描述技术是国内外近二十年来发展起来的一项综合评价油气藏的技术。该技术主要应用于地质、测井、地震、生产测试等信息对油藏的几何形态、储层属性、流体性质及其空间分布规律进行研究,从而为油藏综合评价、油藏数值模拟、储量计算、优化开发方案及提高采收率提供可靠的依据。它是一项有效地提高勘探、开发水平和效益的支柱技术,因而引起了国内外的普遍重视,并获得迅速发展。

裂缝性油藏是油田勘探、开发过程中难度最大的油藏类型之一。中国西部油田裂缝性油藏丰富,进行裂缝性油藏描述及预测,无论是对中国西部还是对中国东部深层油田,均具有深远的意义。

众所周知,裂缝性油气藏中的油气流动一般受裂缝系统控制,这些裂缝系统既可以增加(Narr 和 Currie1982; Nelson1981; Tillman1983; TillmanBarnes1983; Watts1983)也可降低(Stearns 和 Friedman1972; Dunn 等 1973; Pittman1981; Aydin 和 Tohnson1983; Wilke 等 1985; Gabrielsen 和 Koestler1987Antomellini 和 Aydin1994)岩石的渗透率。这就强调了在进行裂缝性油藏研究中,预测裂缝频率和空间分布的必要性,也强调了评价各种规模裂缝的必要性。在裂缝总体系统中,裂缝的分布可能受到各种参数(如埋藏抬升史、层厚流体压力、粒度、与断层和褶皱等主构造有关的距离和位置)不同程度的影响,这意味着变形岩石在地质历史的不同背景和不同阶段产生的裂缝可能具有完全不同的裂缝频率和空间分布。

近年来,许多研究者在定量描述裂缝总体方面做了可贵的探索,这些研究探讨了断层规模和断距之间的关系(Watterson 1986; Barnett 等, 1987; Walsh 和 Watterson1987, 1988, 1989; Marrett 和 Allmendinger1991; Cowie 和 Scholy1992a, b; Cillespie 等, 1992; Jackson 和 Sanderson1992);探讨了裂缝频率和体积应变间的关系(Childs 等 1990; Walsh 等 1991; Schole 和 Cowie1990)。这些研究将有助于正确预测裂缝分布及其连通性。

本书作为石油大学(北京)油藏描述与预测研究所油藏描述系列专著之一,以火烧山油田为背景,通过对相似露头区进行野外描述、观测、分析,对裂缝性质、裂缝属性参数(如裂缝产状、开度、充填物切深等)进行描述与分析,总结了裂缝发育程度与岩性、层厚等的配置关系,建立了裂缝系统定性、定量判别模式,提出了裂缝性油藏视储集空间构成理论,对裂缝系统进行了定量表征及预测。系统阐述了裂缝性油藏描述的内容、流程及关键技术。旨在抛砖引玉,以供中国西部油田、中国东部深层裂缝性油藏勘探、开发借鉴。

全书共分八章,第一章系统阐述火烧山油田裂缝性油藏基本地质特征,并针对此地质特征,提出裂缝性油藏描述的技术路线、研究内容、关键技术与流程。第二章则在系统阐述露头区裂缝分布特征基础上,详尽地描述了裂缝观测与分析的技术。第三章通过野外露头观察,建立了研究区储层裂缝原模型,并探讨了研究区构造裂缝的形成机制。第四章详细阐述了利用构造数值模拟、实验室分析、测井评价、钻井资料、动态试井资料定量识别评价裂缝性储层的技术与方法。第五章以火烧山油田 H3 层为背景,详细阐述了裂缝性油藏储层的沉积相、沉积微相与裂缝发育程度的关系。着重探讨裂缝性油藏储层微观孔隙特征,从机理上认识裂缝性油藏储层对油气运聚富集的贡献。在此基础上,研究了裂缝性储层参数描述与预测的方法,并尤其强调了神经网络模拟及预测技术在裂缝性储层参数预测中的应用。第六章则从油藏动态资料分析入手,通过借鉴国内外典型裂缝性油藏生产特点,阐述裂缝性油藏渗

流机理，弄清裂缝性油藏渗流屏障、渗流差异及渗流敏感性。在此基础上，对其注采压力系统、开发层系合理划分、井网井距科学部署进行了探讨。第七章创造性地探讨了裂缝性油藏三维地质模型的建立，并从点到线到面到体，由静态到动态，对裂缝性油藏进行了综合评价及预测。第八章则在前述研究、评价成果基础上，提出了对裂缝性油藏的综合治理措施及优化开发模式。

书中前言及第一章由王志章、熊琦华编写；第二章由王志章、张淑品编写；第三章由王志章、徐樟友编写；第四章由王志章、蔡毅、童亨茂、徐樟友、吴欣松编写；第五章由蔡毅、刘宇红编写；第六章由徐樟友、张淑品编写；第七章由王志章、蔡毅、吴欣松、张淑品编写；第八章由王志章、熊琦华、徐樟友等编写。曾纪烈、陈焕详、王少峰、刘辉元、徐学成、游志兴、邢秀英、蔡军等参加了本书的研究工作。参加本书研究工作的还有张详忠、方朝亮、尹东迎等同志。全书统稿工作由王志章同志完成。

总之，本书旨在通过对火烧山油田裂缝性油藏的系统研究，从机理上对裂缝性油藏进行科学的勘探、开发、管理，为中国西部油田及中国东部深层裂缝性油气田的合理勘探与开发提供科学的依据。

由于本书只是针对火烧山油田这一典型裂缝性油藏的高度概括与总结，书中采用的技术、方法肯定有不妥之处，恳请国内外专家、同行批评指正。

作 者

一九九九年一月

目 录

第一章 裂缝性油藏描述研究	(1)
第一节 油藏描述研究进展及发展趋势.....	(1)
第二节 裂缝性油田基本地质特征.....	(2)
一、地质概况.....	(2)
二、开发简况及开发效果.....	(4)
三、油田研究现状.....	(5)
第三节 裂缝性油藏的复杂性、特殊性.....	(6)
第四节 裂缝性油藏描述研究的技术流程.....	(8)
一、裂缝性油藏描述内容及其流程.....	(8)
二、裂缝性油藏描述关键技术与方法.....	(9)
第二章 裂缝系统描述原理及方法	(12)
第一节 裂缝系统描述原理	(12)
一、定性描述	(12)
二、定量表征	(12)
三、裂缝结构形态与构造的关系	(13)
第二节 裂缝系统描述方法	(13)
一、直接观测分析方法	(13)
二、钻井工程、油藏动态分析方法	(14)
三、主要测井方法	(15)
四、实验室研究方法	(18)
五、其它方法	(19)
第三节 相似露头区构造裂缝系统描述	(21)
一、相似露头区的选取	(21)
二、构造裂缝的野外识别和描述	(22)
第四节 岩心裂缝系统描述	(23)
第五节 显微构造裂缝系统描述	(24)
一、火烧山油田显微构造裂缝的发育特征	(25)
二、分布规律	(25)
第三章 裂缝原模型及其形成机制	(26)
第一节 裂缝原模型	(26)
一、构造裂缝特征	(26)
二、构造裂缝与主控因素间的关系	(32)
第二节 裂缝形成机制	(34)
一、构造应力场	(34)
二、裂缝的形成期	(35)
三、构造裂缝发展演化历史	(35)

第四章 裂缝系统定量评价及预测	(36)
第一节 构造裂缝数值模拟法	(36)
一、古构造应力场数值模拟	(36)
二、构造裂缝的模拟计算与预测	(37)
第二节 利用实验室分析资料评价并预测裂缝	(42)
一、利用岩心波速异性测定水平最大主应力方向	(43)
二、利用岩石凯塞效应测定就地三向应力大小	(44)
三、利用岩心的古地磁确定地层中应力方向与天然裂缝方向	(45)
第三节 储层裂缝测井评价	(50)
一、储层裂缝测井评价概述	(50)
二、利用 SHDT 识别评价裂缝	(50)
三、利用 FMS 识别评价裂缝	(51)
四、利用 FMI 测井识别评价裂缝	(54)
五、利用常规测井信息识别评价裂缝	(57)
第四节 钻井工程分析方法在储层裂缝预测中的应用	(64)
一、钻井取心观测分析	(64)
二、钻井液漏失分析	(65)
三、固井质量评价与裂缝预测	(66)
第五节 油藏动态分析方法在储层裂缝预测中的应用	(68)
一、油井初期产能高、高产期短	(68)
二、注水井注入压力偏低是构造裂缝存在的标志之一	(69)
三、油井见水快、含水上升快、水驱油效果差	(69)
四、裂缝的存在造成产注剖面的不均衡性	(69)
五、试井资料解释及高精度电子压力干扰试井分析评价裂缝发育地区	(70)
六、示踪剂试验判断储层中构造裂缝的发育程度和方位	(71)
第六节 储层裂缝综合识别与评价	(73)
一、储层裂缝识别概念模式	(73)
二、图版模式	(73)
三、多参数定量模式	(74)
四、储层裂缝综合识别与评价	(74)
第五章 基质储层描述及预测	(82)
第一节 基质储层特征描述	(82)
一、沉积特征描述	(82)
二、成岩作用特征描述	(85)
第二节 基质储层参数模拟及预测	(92)
一、基质储层特征分析	(92)
二、储层参数神经网络模拟预测	(94)
第六章 油藏渗流地质特征研究	(102)
第一节 裂缝与基质间的油水交换机制及影响因素	(102)
一、裂缝与基质间油水两相渗流的机理	(102)

二、岩心吸渗实验——基质岩块供油能力分析·····	(102)
三、影响因素·····	(104)
第二节 油藏渗流介质场划分及其渗流特性分析·····	(105)
一、试井资料重新解释及渗流介质划分·····	(105)
二、分布·····	(106)
三、不同渗流介质类型储层的渗流特性·····	(106)
第三节 油藏渗流屏障研究·····	(107)
一、隔层特征分析及评价·····	(108)
二、夹层研究·····	(111)
三、渗透性有限、厚度可忽略不计的夹层的特征·····	(113)
第四节 油藏渗流差异及剩余油分布特点·····	(113)
一、油水流动的偏流现象·····	(113)
二、水淹裂缝及未水淹裂缝的识别·····	(114)
三、剩余油分布特点·····	(114)
第五节 油藏渗流敏感性及注采压力系统评价·····	(115)
一、H3 层压力系统基本特征 ·····	(115)
二、开发技术界限的确定及评价·····	(116)
第六节 开发层系、井网、井距的适应性分析·····	(123)
一、开发层系划分的依据·····	(123)
二、火烧山油田开发层系划分·····	(123)
三、井网、井距适应性分析·····	(123)
第七章 裂缝性油藏地质模型及评价·····	(124)
第一节 H3 层油藏概念模型 ·····	(124)
一、地层格架模型·····	(124)
二、构造模型·····	(124)
三、沉积模型·····	(125)
四、成岩模型·····	(126)
五、流体地化模型·····	(126)
第二节 单井地质模型·····	(127)
第三节 井间储层裂缝分形预测模型·····	(127)
一、正演井间分形克里金的理论基础·····	(128)
二、正演井间分形克里金的具体步骤·····	(130)
三、分形维数计算·····	(130)
四、H3 层井间裂缝分形预测模型 ·····	(135)
第四节 裂缝性储层静态地质模型·····	(137)
一、建模方法及步骤·····	(137)
二、基岩储层静态地质模型·····	(138)
三、裂缝平面分布模型·····	(139)
第五节 生产特征评价·····	(148)
一、注水非正常水窜严重·····	(148)

二、固井质量差为地层水和注入水流动创造了天然通道·····	(148)
三、油层污染严重·····	(149)
四、渗流介质结构复杂、储层物性差·····	(149)
第六节 裂缝性储层综合评价及潜力区预测·····	(149)
一、储层裂缝分布评价·····	(149)
二、裂缝发育程度评价·····	(149)
三、基质储层综合评价·····	(151)
四、裂缝性储层综合评价及潜力区预测·····	(151)
第八章 裂缝性油藏优化开发模式·····	(155)
第一节 调整产注剖面·····	(155)
一、分层注水·····	(155)
二、酸化、压裂改造裂缝相对不发育层段·····	(156)
三、增注与封堵调相结合·····	(156)
第二节 不同渗流介质区采取相应的措施·····	(157)
一、行列注水措施·····	(157)
二、停注降压开采·····	(161)
三、强注强采、适时提液·····	(163)

第一章 裂缝性油藏描述研究

第一节 油藏描述研究进展及发展趋势

随着油田的勘探和开发不断深入,勘探开发难度日趋加大,投资日益增加。这就要求石油地质工作者尽可能地掌握油藏的各种参数及其分布,提高勘探开发效益。因此,必需建立反映目前情况下的不同规模地质特征的储层、油藏地质模型,对油藏进行三维空间定量的一体化系统研究——油藏描述。

油藏描述技术是国外近二十年随着计算机技术进步发展起来的一项综合评价油气藏的技术。该技术主要应用于地质、测井、地震、生产测试等信息对油藏的几何形态、储层属性、流体性质及其空间分布规律进行研究,从而为油藏综合评价、油藏数值模拟、储量计算(或复算)、优化开发方案及提高采收率提供可靠的依据,是一项有效的提高勘探、开发水平和效益的支柱技术,因而引起了国内外普遍重视,并获得迅速发展。

勘探开发的实践表明,勘探开发的成败关键在于对油藏认识是否符合客观实际。国外首先由斯伦贝谢测井公司在 70 年代提出以测井为主体的油藏描述技术服务(或油藏研究),并于 1985 年将三维地震资料及 VSP(垂直地震剖面)资料引入油藏描述的测井井间相关研究中;斯伦贝谢公司油藏描述强调以测井为主体模式化的技术,多学科的协同研究及最终的储层三维模型。近十年来各个石油公司纷纷引用并迅速发展了这一技术。

油藏描述研究内容和方法通常包括:

- (1) 关键井研究;
- (2) 测井资料数据标准化;
- (3) 单井综合测井评价;
- (4) 多井处理研究井间地层对比;
- (5) 渗透率及单井动态模拟研究;
- (6) 储层参数集总及储集层绘图。

近十年来,我们对处于滚动勘探开发阶段的牛庄岩性油藏;辽河冷东—雷家油田砾岩稠油油藏;对处于开发初期阶段的大港枣园油田高度非均质复杂断块油藏;处于开发中后期的华北荆丘油田晋 45 断块厚层块状油藏、中原胡状集胡 12 块层状非均质油藏、南阳双河油田砂砾岩岩性油藏、塔中 16 低幅度构造油藏、吐哈丘东气藏进行了描述与评价,取得了明显的经济效益。总结出了适应于不同油藏类型、不同勘探开发阶段的油藏描述技术路线,提出了储层岩石物理相及油藏渗流地质学新理论及其相应的配套技术。应用实践证明,这些新理论、新技术和新方法的正确实施,在油田的勘探阶段能够预测油气富集区、高产区,保证钻井成功率。在油田的开发初期可为油田开发方案的调整、井网的布置提供依据,为改善油田的开发效果提出了具体的措施,在开发后期,可有效地确定研究区剩余油的分布,为三次采油,最终提高采收率奠定基础。

伴随计算机技术快速发展及广泛应用,油藏描述技术正向定量化、自动化、综合化、可

视化方向发展。

裂缝性油藏是油田勘探、开发过程中难度最大的油藏类型之一，进行裂缝性油藏系统描述及预测，尚属目前的前沿性攻关难题。

第二节 裂缝性油田基本地质特征

一、地质概况

火烧山油田为一典型的构造裂缝性油田，位于准噶尔盆地东部、克拉美丽山南麓，地理坐标为东经 $88^{\circ}58' \sim 89^{\circ}04'$ ，北纬 $44^{\circ}45' \sim 45^{\circ}00'$ ，与其西南的乌鲁木齐相距 210km，属新疆维吾尔自治区吉木萨尔县所辖，如图 1-1。

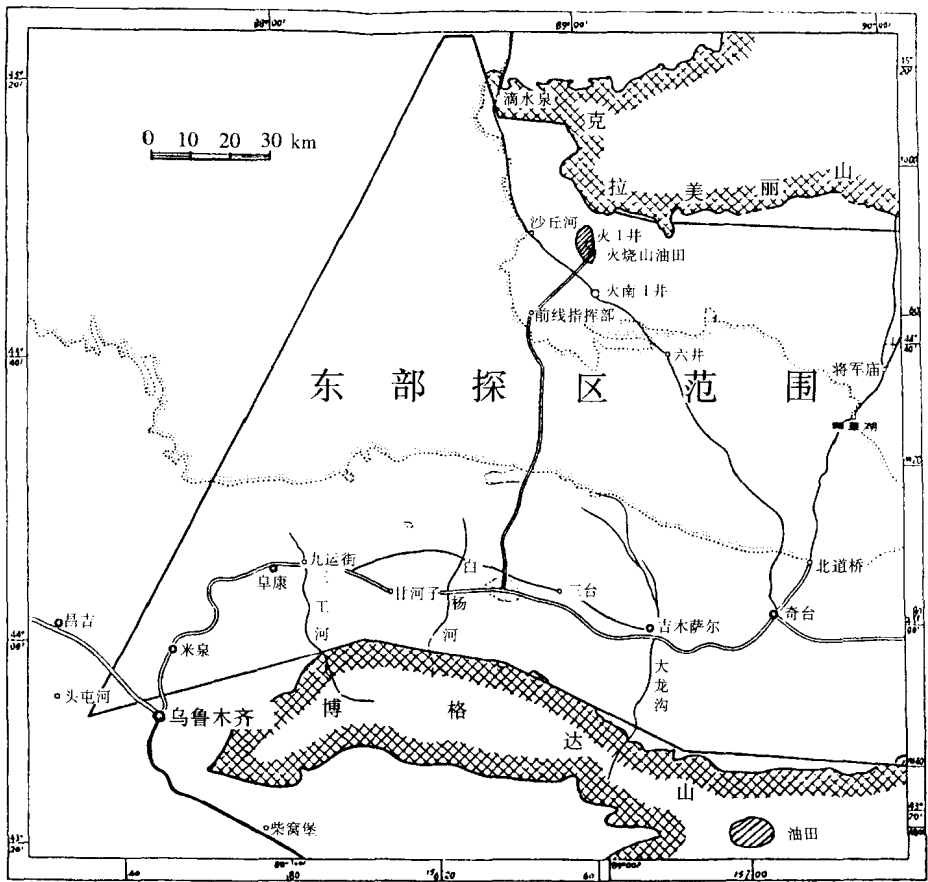


图 1-1 火烧山油田地理位置图

该油田为一完整的背斜构造油田，构造上处于帐北隆起带最北端的沙帐凸起上。沙帐凸起由一系列近南北走向的雁式褶皱构造所组成：由西向东依次为沙丘河背斜、沙东向斜、火烧山背斜、火东向斜、帐篷沟背斜等依次相间排列。各背向斜间均有断裂分隔，分别是沙西、沙东、西大沟、帐东等逆断层。由于区域隆升的差异，使得火烧山、沙丘河、帐篷沟三个背斜的保存与破坏程度相差很大。保存最完好的火烧山背斜，地层齐全，形态完整，未受

明显侵蚀作用，从而成为准噶尔盆地东部地区最大的油田之一；沙丘河背斜虽然具有完整外形，但顶部已被剥蚀，侏罗系地层也很薄，埋深很浅；帐篷沟背斜所受破坏最严重，背斜核部已出露于地表，侏罗系、三叠系被剥蚀，上二叠统被剥蚀，上二叠统平地泉组直接出露地表。

火烧山背斜为一南北走向不对称背斜，东陡西缓，陡翼倾角 20° 左右，缓翼倾角 6° 左右，其南北轴长 9.6km、东西轴长 4.8km，闭合面积 35.2km^2 ，闭合高度 211m。背斜东西两翼不对称，东翼较陡地层倾角 20° 左右，翼部还被火 10 井断裂切割。西翼较缓，倾角 6° 左右。

油田含油层系为上二叠统平地泉组（P2P）的中下部。目前将这套含油层系称为火烧山含油层系（H），并从上到下分为 H1、H2、H3、H4 四个油层组。含油层系属淡水湖泊型沉积，沉积剖面中发育了湖成三角洲相、滨湖相—深湖相沉积物。因此，岩石类型较多，主要有砂岩类、砾岩类、碳酸盐岩类、泥岩类为主，方沸石岩、硅质岩、有机质及凝灰质岩，较为少见，一般呈微层—薄层、条带状、透镜状或团块状存在于其他岩石中。各油层组之间有较稳定的泥岩隔层，H1~H2 间有 4.5~10m 泥岩层，H2~H3 间有 8.5~13m 左右泥云岩，H3~H4 间有 15~21m 泥云岩。各油层组又可分为 2~3 个砂层组，各砂层组又细分为小层，共有 4 个油层组，11 个砂层组，29 个砂层。

该区储层孔隙类型较多，有粒间孔、溶蚀孔、粒内孔、晶间孔和裂缝。主要为次生的粒间溶孔和粒内溶孔。

孔隙具有喉道小（喉道半径 $0.02\sim 0.06\mu\text{m}$ ）、孔喉配位数低（ $0\sim 2$ ）等特点。孔隙度自上而下逐渐增大（H1 层为 13.0%、H2 层为 12.0%、H3 层和 H4 层的孔隙度分别为 14.0% 和 41.0%）。由渗透率—孔隙度关系求得基质渗透率 H1 为 $1.9\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、H2 为 $0.32\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、H3 为 $1.8\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、H4 为 $10\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，体现出自上而下逐渐变好的特征；而压力恢复曲线计算的有效渗透率分别为（ $43.7\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、 $251\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、 $162\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 、 $100\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ），则有自上而下变小的特征，说明储层中裂缝发育程度是自上而下变弱的（除 H1 外）。而基质渗透率远小于有效渗透率，说明裂缝在渗流过程中所起的作用是很大的。

压汞资料有以下特点：毛管压力曲线形态为分选差的粗歪度型，排驱压力和饱和度中值压力较高（排驱压力 $0.5\sim 4.2\text{MPa}$ ），进汞饱和度较高（ $62.3\%\sim 88.8\%$ ），退汞效率较低（ $25.8\%\sim 34.6\%$ ）。

从相渗透率曲线形态看，随着含水饱和度的增加，油相渗透率下降快，水相渗透率上升慢，等渗交叉处相对渗透率为 0.11，含水饱和度为 56.0%。根据相渗透率绘制的分流曲线当含水 95% 时，含水饱和度仅为 65.0%。

由离心自吸法测得岩石润湿性为中—强亲水。

四个油层组有着同一个压力系统，油层中部折算原始地层压力为 14.96MPa，压力系数 0.956，饱和压力 19.94MPa，地层饱和压差 2.02MPa，饱和程度 86.5%，属高饱和程度的未饱和油藏。原始溶解度 $50\text{m}^3/\text{m}^3$ ，体积系数 1.134，压缩系数 14.848。地下原油密度 $0.814\text{g}/\text{cm}^3$ ，粘度 $8.9\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。原油凝固点较高平均为 11°C ，初馏点平均 132°C ， 205°C 前馏分为 7%。

溶解气相对密度平均为 4.6225，平均甲烷组分含量为 88.0%、乙烷为 4.0%、丙烷为 3.0%、丁烷 2.0%、戊烷 1.0%，氮气 2.0%。

油田水型为 NaHCO_3 型，矿化度 $11000\text{mg}/\text{l}$ 左右，氯离子含量 $5000\text{mg}/\text{l}$ 左右。

火烧山油田是一个多油层的油田，所划分的四个油层组其砂体在平面上的展布、亦是由下向上变差。H1~H3 砂层呈透镜体状分布，油层的发育受到岩性的控制。H4 的砂层呈席状展布，油水分布受到构造控制。油藏普遍存在边底水，一般油水界面在 -1042m 左右，因受到岩性和构造的控制，其油水界面并不统一。

油藏天然能量主要为弹性和溶解气驱，由于地层饱和压差小，弹性能量弱、弹性产率为 $14.87 \times 10^4 \text{t}/\text{MPa}$ ，采出程度只有 0.44% 。油藏天然气溶解度只有 $50\text{m}^3/\text{m}^3$ ，压力系数 0.956 ，溶解气驱能量也不大。油藏具有一定的边底水能量，如火 1 井试采中日产水 14.23m^3 ，火 2 井日产水 90.8m^3 ，但在油层内部边底水并不活跃。

油藏有明显发育的裂缝，从钻井取心和裂缝识别测井中都可以见到，储层内裂缝发育，据岩心观察和 FMS 与 SHDT 测井资料表明全区均有分布。岩心观察中最长的缝有 19.6m ，平均缝长 0.57m ，以高角度（大于 79° ）直劈缝为主，小于 60° 的只占 9% ，裂缝的发育与岩性有关，按裂缝密度排序，泥质粉砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、细砂岩、中砂岩、泥岩依次减少。根据裂缝在储层中的存在形态分为充填缝、闭合缝、微裂缝、开启缝、潜在缝五类。据取心、试井和动态资料看，裂缝相当数量为显裂缝。第一类为充填缝，这类缝规模不大、数量不多，发育断续，缝宽均在 0.5mm 以下，全被方解石和方沸石充填死，形成较早，常见被后期的直劈裂缝错开。第二类为闭合缝，这类缝错开层理，缝面有压溶现象，有时见擦痕，缝面结合很紧密，一般不易劈开。第三类为微裂缝，这类缝肉眼不易观察，只有在镜下才能看到，它包括微裂缝隙、微断裂和缝合线等，在荧光薄片下可见缝内有烃类发光现象。第四类为开启缝，这类缝的特点是缝洞有溶蚀现象，也见有石英等矿物和油迹，这类缝的规模大小不一，但常可见到裂缝至层面终止。第五类是潜在缝，这类缝面新鲜、干净、既无充填物、也无溶蚀现象。从 15 口井 986.83m 岩心中，观察到裂缝岩心有 301m ，其中以泥质粉砂岩、粉砂岩中裂缝最为发育，平均每米 0.465 条，缝长 0.57m ，泥岩、白云质泥岩和中砂岩裂缝不发育。裂缝的产状多为高角度，倾角以 79° 为主， 60° 以下的只占 9% 。

二、开发简况及开发效果

油田钻开发井始于 1987 年。当年在油田部署了两个试验区，即 H2 试验区和 H3 试验区。1988 年 4 月油田全面投产，1988 年底油田开始注水，开发方案采用四套 350m 反九点法面积注水井网分别开采 H2、H3、H4¹、H4²。

油田由于裂缝发育，压力系数低，钻井过程中尽管钻井液相对密度降至 1.05 ，但漏失仍相当严重。固井质量也相当差，水泥返高达不到设计要求。

油田注水表现出单井吸水能力强。1989 年底注水井的注入压力为 0MPa 的井 26 口，占注水井的 42.6% ；注入压力小于 1MPa 为 11 口，占 18% ；注入压力 $1\sim 2\text{MPa}$ 的 12 口，占 19.7% ； $2\sim 4\text{MPa}$ 的 9 口，占 14.8% ；大于 4MPa 的 3 口，占 5% ，方案设计平均单井注入量均能达到。

根据油田综合开发曲线，将油田生产特征划分为两个阶段，即 1987—1989 年 12 月为产能建设阶段，这个阶段的主要特点是随着投产井数的增加，产量缓慢上升，但油田含水上升快（1989 年 12 月油田综合含水为 31.2% ）。随着注入水水窜，油井水淹严重，不得不大幅度地控制注入量，1989 年底平均单井日注量从 50m^3 控制到 25m^3 。1990 年 1 月至今为油田递减阶段，这个阶段的特点是产量大幅度下降，含水大幅度上升，1990 年底油田综合含水

已达到 42.4%，1990 年和 1991 年含水上升率分别为 9.4% 和 9.7%、1992 年开始综合治理，停关部分高含水井并进行停注、间注、调剖、堵水等试验，油田综合含水速度得以控制。1993 年 5 月油田综合含水 64.5%，以后逐渐下降为 1994 年底的 53%。另外随着油田地下亏空的逐步增加，地层压力下降严重，部分地区地层压力已降至饱和压力以下。由于供液不足和高含水，停关井增多。至 1994 年底停关井 65 口，占油井总数的 22.5%。

三、油田研究现状

为加快油田建设，摸清油田地下情况，加深对油田开发特点的认识，主要开展了以下工作：

(1) 取得了较多的动态监测资料。

近几年来共取得静压、复压 307 井次，DDL—Ⅲ、两参数、M—240、M—60、同位素、高精度压力计等资料 400 多井次，装偏心井口 16 个，每月分析化验含水、液面、含砂、含铁、氯根 4000 多个，测试流压、液面、示功图等 700 多井次。

(2) 针对压力系数低、油粘、蜡多的油田特点、先后转机械采油井 287 口、占油井总数的 92.2% 左右，最多 1989 年转抽 164 口油井、投转注井 21 口，因此每年都要进行 300 多井次的井下维修工作，每月进行热油清蜡 200 多口井、自用电 2000 多吨、每年损耗 3 万多吨原油。

几年来共进行井下作业工作量近 2000 次，其中正常维修工作检泵、冲砂、地清等作业每年都在 320 多井次以上。

(3) 开展了油藏研究工作。

①开辟了四个井组的开发试验。根据油田具体情况选择了一个低产井组（H1144）进行完善井况增产试验，选择了两个大层窜漏井组（H244、H1230）进行找窜治水试验，选择了 H1351 井组做边水平衡试验。

②对火烧山油田典型井组开展建立地质模型数值模拟工作，做了 64 块样品的岩石力学试验，并应用斯伦贝谢测井新技术对油藏裂缝进行了解释，为认识油藏提供了依据。

③加强了基础资料的整理分析工作：

对不稳定试井成果进行了系统的整理分析；

收集整理压力恢复曲线资料 200 多口；

建立了全油田历年单井开采资料数据库；

系统的鉴定了油水井的固井质量。

④进行了高精度电子压力计干扰试验。

为了查清油层组间泥岩隔层的作用，对在生产动态中发现的 12 个大层水窜井组，选出了三个井组进行了四对水井的高精度压力计干扰试验。它们是 H1230 和 H1166 井，H1230 和 H1177 井，H1254 和 H251 井，H1194 和 H1296 井。

⑤开展了示踪剂试验。

在 H3 层的 H1230 注水井注入了硫氰酸铵示踪剂，在周围 H2 和 H3 层油井上见到了反映，证实了含油层段确实存在严重水窜现象。

(4) 进行了综合治水工艺试验。

①先后应用了五种堵剂进行了 42 井次的堵水调剖试验。

②进行了 3 口隔抽、5 口分压、4 口酸化、14 口分注工艺试验。还进行了尼龙刮蜡器、

空心抽油杆、防膨等试验。

(5) 基本建成了油田配套工程。

完成了 $100 \times 10^4 \text{t/d}$ 产能建设的骨架工程。建成生产井 387 口, 铺设大小集油管线 156.54km, 注水管线 66.01km, 输油管线 85.7km, 供水管线 28km, 油区电力线 151km, 建成发电能力 $1.05 \times 10^7 \text{W/h}$ 电站一座, 计量注水站 41 座, 外输能力 $130 \times 10^4 \text{t/a}$ 的联合站一座。

(6) 开展了许多专题研究。

“八五”期间, 石油天然气总公司将“改善火烧山油田开发效果”列为总公司的科研项目。该项目研究内容分为油田地质、油藏工程、注采工艺三个部分, 共列 23 个二级科研课题, 此外尚完成 5 项项目外课题。从不同侧面对火烧山油田储层裂缝进行了直接和间接的、定量和半定量的描述。工作中, 进行了 5 个井组的示踪剂试验、3 种开采方式试验, 打密闭取心井 2 口、进行了 6 种堵剂、两种压裂液、两种分注管柱、两种酸化技术, 两种热洗防漏管柱及井下放电解堵、高能气体压裂等采油工艺现场实验, 并取得了如下几点结论性认识:

①在含油范围内发现了九条小断裂, 并在断裂的两侧发育着大的裂缝, 形成了与裂缝走向相同的高渗带, 除 1269 井断裂垂直断距较大外 (约 50m) 其它断裂均小于 10m, 断裂不起遮挡作用, 是水窜的主要通道。

②由压汞资料孔隙结构的 16 项参数, 取其中 6 项参数 (孔隙度 ϕ 、渗透率 K 、中值压力 p_{C50} 、孔隙均值 X 、变异系数 C 和退汞效率 W_e) 作聚类分析, 得出孔隙结构可分为四种类型。I 类与其余三类相似系数 0.14, II 类与 III、IV 类相似系数 0.76, III 类与 IV 类相似系数 0.57。各类内部样品间的相似系数均大于 0.9, 反映出四类孔隙界限明显。

但各种指标指示储渗能力是很差的, 孔隙内部非均质程度极高。

纵向上, H4 以 II 类为主, H2 以 III 类为主, H3 以 IV 类为主。

利用油田 16 块实际岩样, 按规定的条件进行渗吸实验, 其渗吸采收率为 16.5% ~ 5.2%, 渗吸终止时间为 14.7~478.6h。据相似原则, 计算实际渗吸时间为 2~50a, 可见利用渗吸作用采油其效果是很差的。

③沉积体系 H1~H3²具扇三角洲特点, H3³~H4 具小型河流三角洲特点, 小层沉积复杂, 微相变化大。

④粉砂质泥岩、粉砂岩易发生裂缝, 大厚层内部不易产生裂缝, 围压时裂缝的产生有一定影响。该区最大主应力方向为南北两交错。

据取心井裂缝面为无充填物的新鲜面这个事实, 推测这些缝在地下是闭合的, 在钻井尤其是水力压裂下将产生人工裂缝。

由于裂缝的普遍存在, 加剧了油藏的非均质性。

⑤油砂体还不是油田开发的最小单元, 油层具有多种流动系统。

⑥显裂缝不易注水开发。压裂、堵水是主要措施。

⑦剩余油主要分布在基质中, 高含水井中亦有未被水充填的裂缝段。

⑧不同治理区, 应采取不同的措施。

第三节 裂缝性油藏的复杂性、特殊性

近十年的油田开发实践表明, 火烧山油田具有明显的复杂性, 开发、管理难度大。具体

表现在以下几个方面:

(1) 发育“米”字型构造裂缝系统, 基质储层供油能力很弱。

根据现有的 7 口 FMS 测井资料解释与板壳模型模拟实验等研究成果, 结合岩心观测结果, 说明 H3 层尤其是北部是本区构造裂缝最发育的层段。含水分析和示踪剂流动试验表明, 水窜方向呈放射状, 以南北方向水窜最快, 其次是北西方向, 北东向和近东西方向也表现了明显的水窜现象, 说明裂缝系统呈“米”字型, 而不是单一方向。同时, 基质储层的供油能力很弱, 岩心吸渗实验表明其半衰期长达 2 年以上, 最终自吸效率仅为 3.24% ~ 15.2%。毛管压力曲线分析表明, 基质储层孔隙中能渗流的孔隙喉道比例很低, 油水交换能力很差; 另外, 在相渗曲线上, 反映了随着含水饱和度的增加, 油相渗透率下降很快, 而水相渗透率的上升弥补不了油相渗透率递减的特点, 说明油井见水后含水上升快, 产量递减快, 驱油效率低, 同时排液量难以提高。

(2) 沉积环境复杂, 储层非均质程度高、物性差。

属小型河流—三角洲沉积, 平面上纵向上相变均较快, 造成储层非均质性相当严重, 砂体数量多、厚度小, 形状复杂, 平均单层厚度仅为 2.6m, 钻遇率低; 储层岩石类型多样, 经历了复杂的以使储层储集物性变差的成岩作用为主的成岩演化历史, 储层物性极差。

(3) 固井质量普遍较差, 造成措施效果差, 开发管理难度极大。

由于油藏中构造裂缝的存在, 地层对钻井液的吸收作用, 固井质量普遍较差, 声幅测井曲线显示 H3 层各井各小层及上中下三个隔层处固井质量均很差, 有的井出现大段大段的无水泥段。统计结果表明, 有 58.2% 的井固井质量为中—差, 是影响油田治理措施效果的主要因素, ①由于固井质量差, 注入堵剂滞留在套管与井壁间的环空中, 或通过环空上下移动到非油层的裂缝系统中, 造成堵水失败; ②地层水管外窜严重, 出水层位不易弄清, 造成隔水失败; ③多数井二次固井后, 固井质量仍然很差, 造成封窜效果不理想; ④酸化时, 酸液管外流动, 挤不进地层中去, 造成酸化成功率极低; ⑤因调剖剂用量不足, 造成调剖失败; ⑥分注井管外窜, 不具备分注条件, 尤其是目前的一级两层分注工艺。

(4) 油藏渗流介质类型多样, 渗流结构系统复杂。

以 H3 层为例, 油藏由三种渗流介质即单一裂缝介质、双重介质和单一孔隙 (微裂缝) 介质组成, 各种渗流介质在纵横向上分布变化多端、交错组合, 形成了复杂的油藏渗流结构系统。

(5) 油层剖面厚度动用程度低, 储产比不协调。

由于油藏中发育“米”字型网状构造裂缝, 油井早期生产时生产压差过大, 固井质量差, 造成水窜快, 大面积水淹严重, 注入水沿裂缝短路循环, 加之储层物性差、渗流孔喉小, 油水交换渗流能力弱, 使得在水淹区内形成大面积被水窜裂缝分割的死油块, 油层剖面厚度动用程度也很低, 经 H262、H263 密闭取心井证实, 只有在裂缝两侧很小的范围内水洗明显, 基质储层中的油基本没有动用, 在高含水区还有相当大的储量, 而产量却很难稳定和提高, 造成储产比严重不协调。

(6) 停产、低能、低产井多, 产量很难稳定。

油井初期生产压差过大, 单层采油强度大、吸水单层突进、地层亏空严重, 加剧边水侵入和底水锥进, 油井固井质量差, 为注水井和地层水提供了一条人工通道, 是油井低产低能的主要原因; 另外, 构造裂缝的存在, 在钻井和井下作业过程中, 钻井液、作业水均有不同程度的漏失到油层中, 造成油层严重污染, 使油层产能得不到发挥, 形成低能低产井; 同