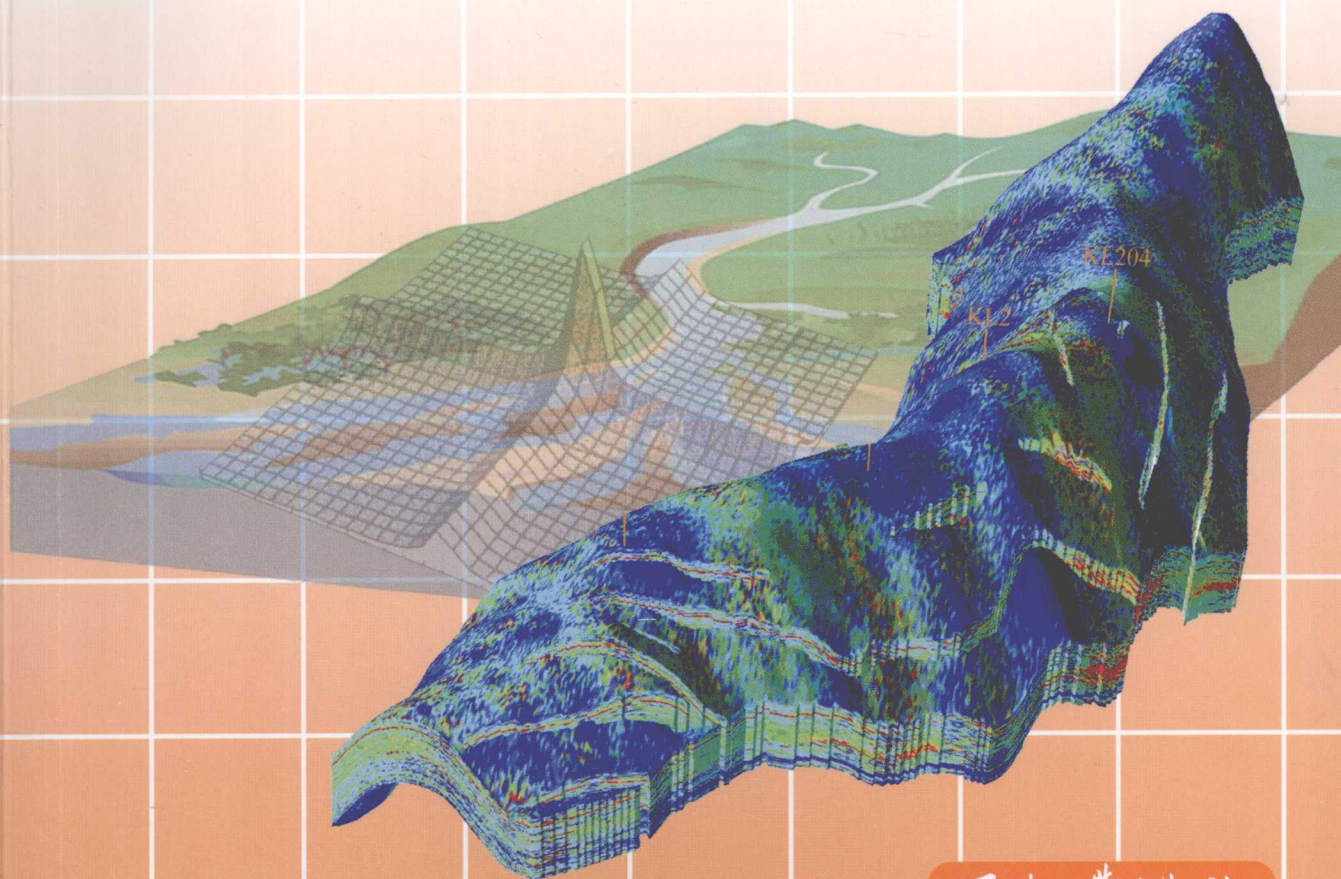




中国石油勘探开发研究院出版物

多条件约束 油藏地质建模

任殿星 田昌炳 等编著



石油工业出版社

多条件约束油藏地质建模

任殿星 田昌炳 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书讲述了多条件约束油藏地质建模的原理及有关实用建模技术和算法。主要内容包
括:油藏描述及地质建模技术的现状、油气藏地质建模技术中涉及的数学及地质统计学原理的
数理公式或解题思路、基于多条件约束油藏地质建模技术上的油气藏地质建模实例等。

本书可作为油藏地质建模软件开发者和油气藏地质建模工程师以及相关专业院校师生的
参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

多条件约束油藏地质建模/任殿星,田昌炳等编著.

北京:石油工业出版社,2012.10

ISBN 978-7-5021-9267-9

I. 多…

II. ①任…②田…

III. 石油天然气地质-地质模型-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 209319 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.com.cn

编辑部:(010)64523541 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 10 月第 1 版 2012 年 10 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:9.75

字数:246 千字

定价:68.00 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

前 言

随着国民经济的快速发展,我国对油气的需求剧增。但最近几年勘探发现的石油和天然气大多处在诸如低渗透、火山岩和碳酸盐岩等地质情况非常复杂的储层中,成熟度较高的老油田又处在高含水期,这对油气田开发提出了新的挑战。作为油气田开发基础工作之一的油藏地质建模工作必须面对挑战,去研发一些高效实用的解决这些复杂储层建模问题的技术手段。多条件约束油藏地质建模技术作为解决这些复杂问题的技术手段之一目前已经成熟。所谓多条件约束油藏地质建模是指在建模工区内,将二维和三维空间中有关的地球物理、地球化学、测井、地质以及开发动态等资料作为限制条件或计算参数,用相关的先进配套技术作手段,建立精度相对较高的油藏地质模型的过程。

在多条件约束油藏地质建模技术中涉及地质、油藏工程、数学、地质统计学和计算机技术等诸多问题。本书中引用侯景儒的现代地质统计学原理,以及于志钧和赵旭东石油数学地质学中的方法作为多条件约束油藏地质建模技术的地质统计学基础;引用数学手册中的解方程组、差分、概率和数理统计等算法作为多条件约束油藏地质建模技术的计算数学基础;引用 OpenGL 中的函数作为多条件约束油藏地质建模技术的图形基础。

实践证明,采用多条件约束油藏地质建模技术中的一种或几种组合就可以解决各种复杂类型的油藏地质建模问题。来自国内大量的不同类型油气藏(砂泥岩、火山岩、碳酸盐岩油气藏)的建模实例表明,充分利用与建模对象有关的静态信息及动态资料,将这些资料作为建模的原始数据或约束条件,灵活应用多条件约束油藏地质建模技术,可较好地解决各种各样的复杂地质建模问题,建立置信度较高的油气藏地质模型。本书重点介绍了多条件约束油藏地质建模技术和其应用的成功案例。

任殿星编写第一章第一节,第三章,第四章,第五章第三、第四、第五节,第六章第二节和第七章相关部分。严耀祖编写第一章第二节。田昌炳编写第二章,第七章第一节第二、第八、第九和第十二部分。冯佩真编写第五章第一节。雷光编写第五章第二节及第七章第一节第五部分。郝明强编写第六章第一节第三部分,第七章第一节第三和第七部分。韩庆时编写第六章第一节第四和第五部分,第七章第一节第六部分。周久宁编写第六章第一节第一部分中的第1、第2和第4小节。李保柱编写第七章第一节第一、第四、第十和第十一部分。

全书经中国石油勘探开发研究院开发所田昌炳教授认真审阅。

本书可作为油藏地质建模软件开发者和油气藏地质建模工程师以及相关专业大中专学生的参考用书。由于笔者水平所限,书中难免有错误之处,望批评指正。

笔 者

2012年2月

目 录

第一章 油藏地质模型及油藏描述	(1)
第一节 油藏地质模型	(1)
第二节 油藏描述	(2)
第二章 中国油气藏地质建模面临的挑战和应对措施	(8)
第一节 高含水老油气藏	(8)
第二节 低渗透油气藏	(9)
第三节 碳酸盐岩油气藏	(10)
第四节 火山岩油气藏	(12)
第三章 油藏地质建模方法与技术现状	(14)
第一节 油藏地质建模方法	(14)
第二节 技术现状	(17)
第四章 多条件约束油藏地质建模	(18)
第一节 多条件约束油藏地质建模概念	(18)
第二节 多条件约束油藏地质模型的建立	(19)
第五章 多条件约束油藏地质建模技术中的数学方法	(22)
第一节 概率法	(22)
第二节 回归分析	(27)
第三节 地质统计学分析	(33)
第四节 常用的解方程组法	(47)
第五节 偏微分方程的差分解法	(50)
第六章 多条件约束油藏地质建模技术	(53)
第一节 多条件约束油藏地质建模技术中的通用技术	(53)
第二节 多条件约束油藏地质建模技术中的创新技术	(73)
第七章 多条件约束油藏地质建模技术在各类型油气藏建模中的应用	(81)
第一节 砂泥岩类型油气藏	(81)
第二节 火山岩类型油气藏	(116)
第三节 碳酸盐岩类型油气藏	(136)
参考文献	(147)

第一章 油藏地质模型及油藏描述

一口有工业价值油气流的探井在某地区成功后,围绕着该探井所属油气藏的构造形态,储层类型及规模,油、气、水的分布,油气储量规模,油、气、水性质,油气藏的天然能量等问题的各项工作就会相继或同时展开。为准确表征出油气藏的以上这些动静态特征,首先是根据地震解释初步资料,确定第一口、第二口……评价井的井位,待评价井完钻后,从地球物理地震处理解释、地球物理测井、地质实验室、油田开发地质到油藏工程等部门的地质师和工程师们就会认真分析油气藏主力层或邻近的区域标志层的构造形态和断层组合规律,根据储层测井曲线解释油、气、水层,确定储层孔隙度、渗透率、饱和度,油、气、水的物性,进行开发小层划分对比、油气产能和开发概念设计等研究工作。这一表征油藏静态特征的过程就是早期油藏描述。油藏描述工作随着油气藏的开发和调整在反复进行着,直到油气田开发到后期还要进行精细油藏描述。把油藏描述的成果借助于现代计算机技术将油藏各种地质特征在二维和三维空间的变化及分布定量表述出来就靠油藏地质模型。

第一节 油藏地质模型

油藏地质模型是将油藏各种地质特征在二维和三维空间的变化及分布定量表述出来的二维和三维数据体。它是油藏描述的最终成果,是油藏综合评价和油藏数值模拟的基础,是新油田开发方案优化和老油田综合调整的依据。其重要意义在于可提高勘探和开发的预见性。

一、构成

一般情况下,一个完整的油藏地质模型应该由构造模型、储层模型、流体模型以及驱替模型等构成,如图 1-1 所示。

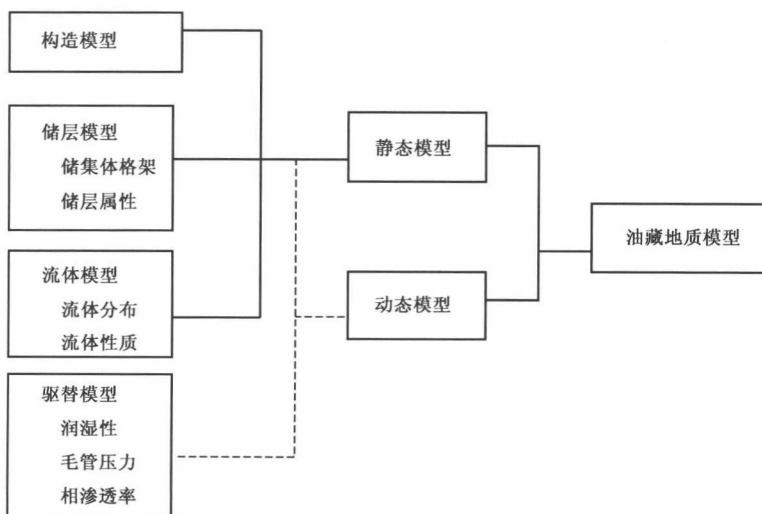


图 1-1 油藏地质模型构成图(选自裘怿楠《油藏描述》)

二、分类

油藏地质模型的分类,目前有很多方法,按不同开发阶段,占有基础资料的程度不同,完成地质任务有所差别,同样所建模型的侧重点及精度也不同。因此,按不同开发阶段将储层地质模型分为概念模型、静态模型和预测模型。对不同开发阶段所建立的地质模型,按三步建模程序分一维井模型、二维层模型和三维整体模型。

第二节 油藏描述

由于地质模型是油藏描述的最终成果,因此,了解油藏描述的概念和历程以及发展趋势对理解油藏地质建模技术有着重要的帮助。

一、定义

现代油藏描述是以沉积学、石油地质学、构造地质学、储层地质学、层序地层学、地震地层学、地震岩性学、测井地质学和油藏地球化学等为理论基础,以计算机技术为手段,对地质、物探、钻井、分析化验和地层测试等多学科信息进行动态与静态相结合的综合分析与处理,以达到对油藏进行定性、定量描述和评价目的的技术方法。

二、油藏描述发展历程

油藏描述(Reservoir Characterization)最早是由斯伦贝谢公司在20世纪70年代首先提出的、以测井为主体的油田技术服务项目(RDS),并提出油藏评价的核心是测井油藏描述。直到1985年斯伦贝谢公司才将三维地震资料及垂直地震剖面(Vertical Seismic Profiling, VSP)资料引入到油藏描述的测井井间相关的研究中,但它强调的描述仍是以测井为主体模式的技术、多学科协同研究及最终的储层三维模型。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、表征和预测放在突出重要的位置来加以研究。

斯伦贝谢公司提出的油藏描述应分为:

- (1) 油田地质构造与储集体几何形态的研究;
- (2) 关键井的研究;
- (3) 测井资料标准化;
- (4) 测井相分析;
- (5) 油田参数转换与渗透率的研究;
- (6) 井与井间的地层对比;
- (7) 单井综合测井地层评价;
- (8) 储层参数的建立与作图;
- (9) 计算油田的油气地质储量;
- (10) 单井动态模拟;
- (11) 测井数据库的建立与应用。

20多年来,油藏描述发展迅速,总体上可以分为3个时期。

1. 以测井为主体的油藏描述

20世纪70年代,油藏描述重点是应用于油气田开发阶段的油藏动态监测及最终采收率

的评价,其特点是以测井资料为主,综合地震、岩心、录井、区域地质及生产测试等数据研究整个油田的构造和储层的几何形态和岩相,定量描述油气藏基本参数在空间分布的规律,计算油气地质储量,研究油田开发过程中油藏基本参数的变化,从而对全油田的油气藏进行静态与动态的详细描述。

2. 多学科协同油藏描述

随着油气勘探开发难度加大,投资费用的不断增加,要求石油地质工作者尽可能地掌握油藏各种地质特征,依据不同勘探开发阶段,不同的信息类别及资料,研究并描述油藏三维空间分布,建立不同类型的油藏地质模型。在 20 世纪 80 年代各国均发展了以不同学科信息为主体的不同类型的油藏描述。

(1) 以地质为主体的油藏描述。

这种描述以地质方法为主,以测井单井评价方法为辅。它是建立在个别井点基础上的研究,不能满足降低勘探风险和提高开发效益的要求。

(2) 以物探为主体的描述。

地震信息具有覆盖面广、信息量大、可提供无井区以及井间地震信息的优势。所以它成为油藏描述中不可缺少的信息之一,但地震技术需结合井资料才能做出符合实际的描述。它的弱点在于分辨率较低,多解性强。

(3) 以测井为主体的描述。

在斯伦贝谢公司提出的以测井为主体的油藏描述技术后,1985 年,将三维地震及 VSP 资料引入油藏描述的井间相关对比研究中,但仍然是以点的描述为基础,且不同类型复杂油气藏都用程序化的软件系统及技术,往往使得提供的模型在一定程度上是错误的或不完善的。

(4) 以油藏工程方法为主的描述。

在开发阶段,油藏描述不可缺少的是油藏动态描述,因而以油藏工程方法为主的描述技术应运而生。主要是利用各种测试信息、生产动态信息、观察井信息与生产测井信息等,研究油藏动态变化特征、流体渗流机理与温压条件变化,进行单井的动态模拟与历史拟合,以预测油藏随时间的变化特征,进行油藏四维变化特征的描述。

3. 多学科一体化油藏描述

由于单一学科技术发展虽然进步很大,但各自都存在不利的方面。因此,20 世纪 90 年代以来,逐步向多学科一体化描述发展,即应用地质、物探、测井、测试等多学科相关信息资料,以石油地质学、构造地质学、沉积学为理论基础,以储层地质学、层序地层学、测井地质学为方法,以计算机为重要手段,对油藏进行四维量化研究。

三、油藏描述阶段划分及各阶段的主要任务

国内外关于油藏开发阶段的划分方法基本一致。一般来说,油田发现后可以分为评价阶段→方案设计阶段→方案实施阶段→监测阶段→调整阶段→三次采油阶段,最后到油藏废弃。1988 年,石油工业部制定的《油田开发管理纲要》中,根据我国绝大多数油田实施的注水保持压力开发的特点,把油田开发分为油藏评价阶段、设计实施阶段和管理调整阶段。1996 年,裘怿楠根据常规作法和滚动开发的实际情况,将设计实施阶段细分为设计阶段和实施阶段。2000 年,穆龙新将这些阶段归为早、中、晚 3 个大的开发阶段,或者称为油田开发准备阶段、主体开发阶段和深度开发阶段(提高采收率阶段)。因而,油藏描述也可以根据开发阶段的不同划分为 3 个不同的阶段。

1. 开发准备阶段的早期油藏描述

油田发现后到投入全面开发前的这一阶段可称为开发准备阶段,这一阶段所进行的油藏描述统称为早期油藏描述。该阶段的主要任务是对油藏进行开发可行性评价,进而制定总体开发方案。该阶段钻井资料较少,动态资料缺乏,地震资料多以二维为主,三维地震资料相对不足。开发评价和设计要求确定评价区的探明地质储量和预测可采储量,提出规划性的开发部署,确定开发方式和井网布署,对采油工程设施提出建议,估算可能达到的产能规模,并作经济效益评价,以保证开发可行性和方案研究不犯原则性的错误。油藏描述的任务是确定油藏的基本骨架(包括构造、地层、沉积等),弄清主力储层的储集特征及三维空间展布特征,确定油藏类型和油气水系统的分布。因此这个阶段的油藏描述以建立地质概念模型为重点,把握大的框架和原则,而不过多追求细节,所以称油田开发准备阶段的油藏描述为早期油藏描述。

2. 主体开发阶段的中期油藏描述

油田全面投入开发后到高含水以前称为油田主体开发阶段,在这一阶段内所进行的油藏描述统称为中期油藏描述。油田一旦投入全面开发,钻井资料和动态资料都迅速增加,并逐渐有了多种测试和监测资料等。这一阶段开发研究的任务是实施开发方案,编制完井与射孔方案,确定注采井别,进行初期配产、配注,预测开发动态。生产一段时间后,要进行开发调整,阶段历史拟合和预测开发动态等。为此,这一阶段的油藏描述以进行小层划分和对比,落实在早期油藏描述中没有确定的各种构造等属性,建立静态地质模型为重点。

3. 挖潜、提高采收率阶段的精细油藏描述

油田开发进入高含水后到最后废弃前这一阶段被称为挖潜、提高采收率阶段。这一阶段由于高含水高采出程度而引起地下油水分布发生了很大的变化,开采挖潜的主要对象转向高度分散而又局部相对富集的不再大面积连片的剩余油,甚至转向提高微观的驱油效率上来。早期与中期的那种油藏描述方法和精度已远远不能满足这个阶段的开发要求,它要求更精细,更准确,更进一步定量地预测出井间各种砂体尤其大砂体内部非均质性和小砂体的三维空间分布规律,揭示出微小断层、微构造的分布面貌。油藏描述的重点是建立精细的三维预测模型,确定剩余油的分布空间,进一步提高油田采收率。因此,也把这个阶段的油藏描述称为油田挖潜提高采收率或高含水阶段的精细油藏描述。

四、油藏描述的关键技术与发展趋势

油藏描述技术是一项较新的,且不断发展着的技术,它依靠的是地质、地震、测井、计算机等多学科之间的协同工作,体现了多学科、多工种和高度综合化的特点。油藏描述的发展趋势是:管理方式向多学科协同的集约化方向发展,描述软件向集成化方向发展,描述过程向可视化方向发展,研究向系统化、理论化、精细化和预测化方向发展等。目前比较成熟的技术有:

(1) 储集体地震解释技术:在地球物理勘探中采用高分辨率三维地震勘探技术,进行人机交互解释,采用成图定量描述油藏几何形态和横向预测等技术,包括地震反射特征分析、地震参数综合处理、储集体分类及几何形态地震反演、薄砂体定量解释、储集体的综合解释等内容。

(2) 储层属性参数的测井解释技术:采用高精度密度、声波和地层倾角等方法及其相应的优化处理与多功能解释技术,包括测井资料的采集、测井曲线的预处理和标准化、关键井的研究、优化测井解释方法、多井解释和储层参数的计算等内容。

(3) 油藏综合评价技术:包括储层地质特征、储层参数分布规律、油藏地质概念模型、预测模型及油藏综合评价等内容。

(4) 油藏描述计算机技术:包括油藏描述计算机软件系统、油藏描述数据库、数据处理技术和成果显示技术。

油藏描述技术有如下主要发展趋势。

(1) 地质研究走向精细化和量化。

精细化主要表现为:地质研究的尺度越来越小,研究的基本单元越来越小,量化和预测化的趋势越来越明显。在地层划分上,以层组为单元的地层划分已不能满足实际的需要,以往单砂体尺度的划分也不能满足生产的需要,目前要求在单砂体内部就其结构构造、韵律特征、夹层分布等具体问题上进行深入细致的研究。构造的解释则要求能够解释幅度小于5m的构造,微构造图的等高线小于5m,应表现出断距小于5m、长度小于100m的断层。成岩演化的研究已经远远超越了过去那种简单的定义成岩阶段,而是从成岩的过程进行研究,在盆地范围内,综合研究盆地不同构造单元、不同流体场控制条件下的热力、埋藏、矿物成分、岩石类型等。在油藏范围内,则要研究同一构造、流体场控制条件下的成岩阶次、矿物转化、储层内流体类型、成因单位的沉积机制等内容,在对成岩作用的研究过程中,已经从一维的研究发展到了剖面二维成岩作用的研究,并正在向着三维成岩模拟的方向发展。而近几年发展起来的激光共聚焦技术,开创了测量微观孔隙结构的全新途径,做到了对三维孔隙度和孔隙结构的准确测定,对储层物性给出了准确的评价。

油藏描述量化主要是指定量地质学方面的研究。随着计算机技术的飞速发展、其他相关学科在技术上的进步以及油田生产对剩余油描述精度进一步提高的要求,储层地质学的发展方向将从一般描述到目前的半量化研究,最终发展成为量化研究。定量地质学就是要将地质体的形态、特征、砂体之间的各种比例关系以及砂体内部的各种参数定量地描述出来。定量地质学的研究方法主要包括野外露头解剖、油田密井网解剖和沉积体系的物理模拟与数值模拟等方面的研究。定量地质学要求在研究过程中,除不可用数值表达的地质参数外(如沉积体系、沉积环境等),其他参数则应尽量定量表述。

(2) 测井技术在储层表征中的作用更加突出。

目前,传统测井技术仍然是储层表征中我们所主要依赖的技术,常规测井所能解决的主要问题有:渗透层、有效层和隔层的划分;解释储层中的流体类型和性质;计算储层的孔隙度、渗透率和含油饱和度。除对渗透率的解释不可靠以外,传统测井技术对其他参数的解释精度都可以满足生产的需要。但常规测井由于测井解释分辨率的问题,对薄层的解释还有一定的困难,不能达到老油田对薄层、差层挖潜的需要;对裸眼井及套管井水淹层定量解释还有较多的问题,不能很好地解释地层属性以及地层流体随开发过程的变化;对低渗透储层的测井解释技术还有待进一步改善。目前,对常规测井资料进行挖潜性研究,可以在一定的程度上解决对裂缝的识别问题,其主要依据:含流体裂缝的导电性、裂缝地层的非均质性和各向异性以及裂缝的发育与岩性的关系等。

针对于常规测井所存在的不足,近十几年来发展出了一些新的测井技术如:成像测井技术、核磁共振测井技术和随钻测井。成像测井技术的最高分辨率可以达到0.5cm,可以观察到大的砾石的沉积现象,在确定地层倾角,探测裂缝、空洞,定量描述薄层,确定断层位置等方面取得了重大的突破,在一定程度上具有代替取心的作用。核磁共振测井技术是一种能够测量储层自由孔隙度的新方法,不受岩性、泥质和流体的矿化度影响,可以定量地提供可靠的孔隙度、孔隙大小分布、渗透率和流体的饱和度数据。

(3)地震研究的精细化提高了储层预测精度。

在开发阶段所采用的地震技术,称为开发地震,也称储层地震学或油藏地震学。它是在勘探地震学的基础上发展起来的,充分利用针对油藏的研究方法和属性处理技术,结合钻井、测井、岩石物理、油田地质和油藏工程等多学科资料,在油气田开发和开采过程中,针对油藏特征进行横向预测,做出完整描述和进行动态监测的一门新兴学科。这些技术有:地震目标处理、三维联片处理、迭前深度偏移、高分辨率地震勘探、地震属性分析与烃类检测、相干体分析、定量地震相分析、地震综合解释与可视化、地震反演、储层特征重构与特征反演、AVO分析与反演、3D AVO、井间地震、四维地震、多波多分量等。开发地震的内涵包括两个部分,即储层静态描述与油藏动态管理。

各种地震技术的应用与推广进一步提高了对一般砂泥岩的解释精度,而且对于特殊类型储层,如薄层灰岩、砾岩、泥岩、喷发相火山岩、侵入岩、风化壳等类型储层的解释上也取得了很大的进步。

(4)强化原型地质模型的研究与应用。

油田开发过程中储层研究的主要问题是储层的预测问题。提高储层的预测精度之前,必须解决两个方面的问题:第一,要建一个比较精确的沉积体模型,最起码要比被预测的实体精细程度高;第二,要有一套适合于被预测体的储层预测方法。但其中最根本的还是要有比较精细的原型模型。原型模型(Prototype Model)就是反应一个沉积体系的真实的建筑结构和物性分布模型,以及由此而总结出的储层预测方法。一个沉积体系的原型模型是一个非常庞大的系统,包括了该沉积体系的所有规律和认识。在原型模型的建立过程中,主要有三方面的技术手段和途径:第一,解剖出露头条件好的露头;第二,进行密井网区的解剖;第三,进行沉积体系的物理模拟和数值模拟。

近十几年,通过对扇三角洲和辫状河露头的详细研究,国内建立了非常详细的原型模型和系列地质知识库,其中包括岩相地质知识库、微相地质知识库、砂体规模尺度库以及许多地质统计知识库。根据这些非常实用的知识库,可以较为准确地预测新老油田不同区块和层位的储层非均质性。

对于具有相同或相似沉积环境的油气田来说,在储层非均质性的预测中,原型地质模型是非常实用的。为了预测不同沉积环境的储层变化特征,需要建立系列的原型地质模型。

(5)沉积体的物理模拟和数值模拟是定量地质学发展的重要手段。

我们对古沉积体系的研究(如露头与油田地下储层)主要是靠对沉积体系进行反演完成的,即根据我们所看到的地质现象推测出可能的沉积环境以及由沉积环境所决定的一系列地质属性(包括砂体的规模、配置关系、连续性与连通性以及砂体内部的物性分布规律等),但是整个沉积过程中的各种变化以及由于这些变化对储层产生的影响很难搞清楚,沉积体系的模拟(包括物理模拟和数值模拟)就是为了解决这样的问题而产生的。

所谓沉积体系的物理模拟就是参照沉积体形成过程中的各种地质参数,在实验室内部再现沉积过程。通过沉积过程的物理模拟,研究模拟沉积体内储层的各种属性(物性分布相对值是可以参考的,由于没有经过成岩作用,绝对值与实际储集体的相差很远)。实际上物理模拟是一个涉及水力学、动力学、地质学等多种学科的物理实验。

尽管物理模拟能够实现沉积体正演过程的模拟,并使人们可以清楚了解沉积体形成过程中的各种变化,但由于沉积体的物理模拟时间较长(模拟一个沉积体需要半年左右的时间),经费消耗相对大。因此,在物理模拟的基础上,发展沉积体的数值模拟是对沉积体进行快速正

演的有效途径。沉积体的数值模拟,就是在物理模拟的基础上,加入进行数值模拟所需要的主要控制参数,在计算机上实现沉积体系的正演的过程。

(6)地质统计学和随机建模技术的应用,定量地描述了储层地质模型的不确定性。

起源于矿产地质研究的地质统计学已发展成为一套较完整的思想体系,由于理论上它有种种优点,被作为一种解决问题的重要工具之一,而得到较广泛的重视和应用。地质统计学一般包括3个基本组成部分:空间函数的相关性分析、克里金估计和随机模拟。空间函数的相关性分析是指对变异函数和协方差函数的分析,这是克里金估计和随机模型的基础。

储层的不确定性是客观存在的。在现有资料不完善的情况下,由于储层的结构空间配置及储层参数空间变体的复杂性,人们难于掌握任一尺度下储层的确定且真实的特征或性质,所以储层预测的结果具有多解性是必然的。随机建模技术是以地质统计学为基础,以随机函数来表征储层物性参数的空间变化的技术手段。随机模型既尊重油气储层固有的地质规律,反映储层客观存在的随机性,又能定量地描述由于资料信息的不足和人们认识的局限给储层地质模型带来的不确定性。它为油气田开发战略决策中的风险分析提供了一个重要科学依据,是地质学科发展的一个重要方向之一。

(7)高分辨率层序地层学的发展。

层序地层学作为地质学的一个分支,近十几年得到了很快的发展,特别是在尺度较大的层序地层学研究方法上已经基本成熟,但相对于开发而言的高分辨率层序地层学目前正处于发展阶段。高分辨率层序地层学的核心是如何在识别地层记录中多级次的基准面旋回和多级次的地层旋回。

高分辨率层序地层的分析是以露头、岩心、测井和高分辨率地震反射剖面资料为基础,利用精细层序划分和对比技术,首先,在井剖面上进行高精度的层序地层划分,然后,根据层序的叠置式样进行井间的预测。和一般的旋回对比相比较,由于更多地考虑了时间分辨率,所以在一定程度上可提高对储层的预测精度。高分辨率层序地层学的基本原理包括:地层基准面原理、体积划分原理、相分异原理等。

总之,高分辨率层序地层学目前还处于引进与发展阶段,但从目前的发展趋势上看,极有可能成为沉积学和地质学的一个重要的发展方向。

(8)综合研究将是未来的发展趋势。

从20世纪90年代开始,储层表征技术就表现为明显的向多学科综合发展的方向前进,这主要由于两个方面的原因:一方面,随着各种新储层问题的出现,导致储层研究深度不断增加,任何单一的学科都已经不能解决储层研究所面临的新问题,必须走多学科综合发展的思路;另一方面,储层的研究也已经不是一个单纯的地质问题,而是要作为油藏工程和数值模拟的输入数据来应用,必须同这些学科相互结合起来,才能提供更好更准确的地质模型输入以及油藏数值模参数。

第二章 中国油气藏地质建模 面临的挑战和应对措施

中国大多数油气田形成于陆相沉积环境中,油气藏的类型很多,最主要的有中高渗透多层砂岩油气藏、复杂断块油气藏、低渗和特(超)低渗透砂岩油气藏、稠油油藏以及轻质油藏,还有部分砾岩油藏、碳酸盐岩油气藏、火山岩油气藏等。气藏的类型多数为复杂气藏,除已提到的特(超)低渗透、碳酸盐岩、火山岩气藏以外,还有异常高压气藏、高含硫化氢气藏、高含二氧化碳气藏等。油气藏储层分布范围广泛,从大型坳陷盆地、裂谷盆地至大陆边缘盆地和前陆盆地,从淡水、微咸水、半咸水湖盆至含盐湖盆和湖泊与沼泽交替沉积盆地都有油气储层。油气藏构造复杂,陆相储层的特点决定了油藏构造常常因被断层切割而复杂化,西部常见挤压型逆断层,东部以拉张型正断层为主。油气藏储层复杂多变,因陆相沉积体系相变较快,油气储层连续性和连通性相对差,储层非均质性严重,分布特征复杂多变。储层内流体分布规律多样化,同一油藏中油气水系统较多,部分油气藏中流体分布不仅受构造控制同时也受岩性与岩相控制。

第一节 高含水老油气藏

目前,我国绝大部分中、高渗主力老油田都到了开采后期,油田开发进入高成熟期,即综合含水大于80%,可采储量采出程度大于75%后,综合含水高,产量任务很重。剩余油挖潜成了老油田开发调整的主要任务,相应的油藏地质建模侧重点有了很大的变化。

一、储层特性

这里所说的高含水油气藏主要指以河流相为主的因长期注水开发而导致目前油层生产中含水率大于80%的中、高渗透砂岩储层油气藏。河流相的中、高渗储层特点是渗透率较高,孔隙度较大,层内、层间非均质性较强,主要体现在层内、层间渗透率极差大。其储层孔喉半径相对较大,胶结物多以石英长石为主,胶结相对牢固。不同河流相其储层结构有很大不同,隔夹层的分布规律因相的改变而变化。河流相中剩余油的分布直接受隔夹层的控制这一规律非常明显。长期注水开采导致老油田的储层孔隙结构发生了重大改变,因而油气相渗曲线也发生了变化,集中体现在储层中大孔道的出现(图2-1),大孔道形成的特高渗透带,流体在其中的流动规律可能不再符合达西定律了。

二、储层建模研究面临的挑战和应对措施

由于高含水老油气田的储层结构和油气水相渗曲线发生了改变,导致这些储层内油、气、水的分布关系变得更加复杂。中高层中的低渗透带和物性夹层内是剩余油存在的主要空间;隔夹层,尤其是曲流河侧积体储层内的隔夹层之间也是富含剩余油的地方;井网不完善造成的剩余油死角区同样是剩余油的存在区域。大孔道的出现对注水开发挖潜高含水老油气田中的剩余油气极为不利。堵塞或避开储层中的大孔道进行注水或注汽开发是老油气田剩余油气挖

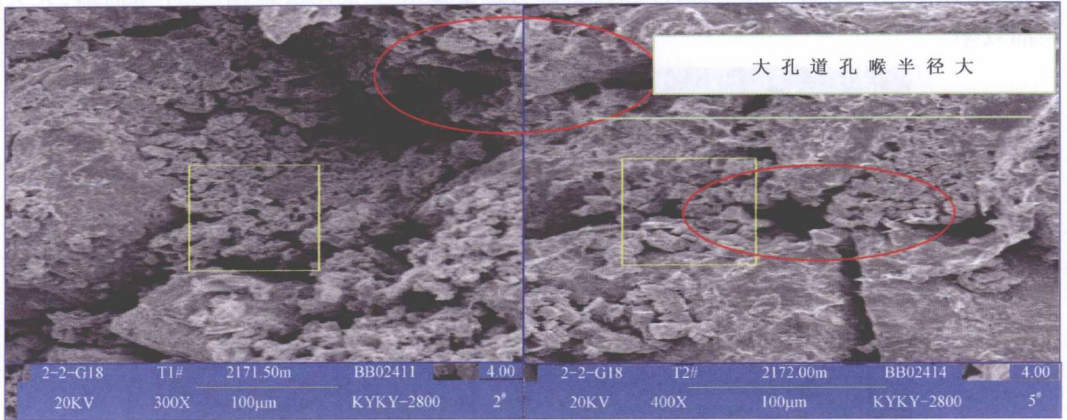


图 2-1 油田现场大孔道照片(图片来自胡水清)

潜的很实用的方法之一。

因此,需要一些有针对性的实用建模技术来定期重建高含水老油田精细油藏地质模型,准确描述大孔道、低渗带、夹层分布位置以及更详细的沉积微相、局部微构造研究,进行剩余油气的分布规律预测和挖潜。

对于这些挑战的应对措施之一是:把地震构造解释、反演资料,地质小层数据表、储层沉积相和微相研究成果,井网数据,油井生产动态、注水示踪剂监测资料,生产测井数据,油藏数值模拟成果,井间四维地震技术资料,区域地应力研究成果等作为计算数据或约束条件,利用我国地质师、油藏工程师工作经验及研发的具有针对高含水老油气田的先进建模技术和方法,建立精细的油藏地质模型,较为准确地刻画描述出大孔道和剩余油的三维空间位置及分布规律,给剩余油挖潜提供方向。

第二节 低渗透油气藏

我国新发现储量中,绝大多数储存在低渗透油藏中。从中部的中生界大型陆相盆地,如四川盆地和鄂尔多斯盆地的上三叠统和侏罗系,既有干旱条件下又有潮湿气候下的河流沉积体系,到由海相盆地向陆相盆地转化的过渡盆地鄂尔多斯石炭系一二叠系,到松辽盆地外围白垩系的葡萄花油层,这些地层中发现了大量的大型低渗透油田和天然气田。

一、储层特征

由于低渗透油藏的主要沉积体系是河流,所以其储层连通性相对较好(图 2-2)。尽管这些油气田都是低渗透储层,但其储层特征差异较大,由于主流喉道半径是渗流能力的主控因素,黏土类型及含量和可动流体饱和度进一步减小了储层的有效渗流空间,导致鄂尔多斯盆地内的低渗透油藏和松辽盆地低渗透油藏的储层特征差别很大。例如,大庆低渗透储层黏土含量高,以伊利石和蒙皂石为主,对渗流空间影响很大。气测渗透率相近的储层,长庆低渗透储层与大庆低渗透储层相比,主流喉道半径大,可动流体饱和度高以及启动压力梯度小。同时,这些低渗透储层中都有一定程度的天然微裂缝存在,微裂缝是低渗、特低渗透储层最主要的渗流通道之一。天然裂缝中有一部分裂缝在正常压力梯度下是处于闭合状态,当地层压力超过

一定程度的情况下,比如注水压力较高时,这部分裂缝就处于张开状态,形成注水通道,大大降低驱油效率。

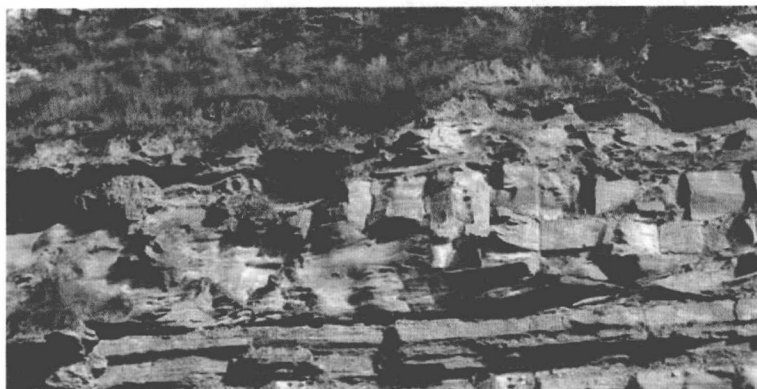


图 2-2 低渗透储层露头(图片来自长庆油田)

二、储层建模研究面临的挑战和应对措施

低渗透油气藏主要沉积体系是河流,而对这类大型盆地中的河流沉积体系的沉积过程和模式的研究,理论总结较少,对勘探开发指导作用不够。因此,需要进一步细致划分出各种不同的河流型,总结出更多种类,而不仅是曲流和辫状两类型式,建立起我国自己的冲积沉积理论体系。其核心是从沉积过程研究入手,理论模拟、实地考察、实验模拟相结合,形成预测砂体的地质模型,指导勘探开发的深入发展,这将是储层地质建模研究的重要方向之一。同时,微裂缝,尤其是在正常压力梯度下是处于闭合状态,而当地层压力超过一定程度的情况下,处于张开状态的动态微裂缝和局部高渗带导致的局部非均质性对油田开发效果影响很大,只有对低渗透储层中微裂缝的产状、特征、面密度、平面分布规律及其对渗透率的贡献率研究清楚,且在低渗带中准确找出渗透率相对较高的条带以及高精度预测其中的动态微裂缝分布规律之后,才可以充分利用天然裂缝,尤其是动态裂缝的优点,避开其缺点提高驱油效率,大大提高低渗透油气田开发的采收率。这些工作的完成就是对低渗透油藏储层地质建模技术研究的挑战。

应对这些挑战的措施之一是:把地震构造解释、反演资料,地球化学勘探资料,钻井资料,区域地应力研究成果,岩心分析、岩石力学参数研究以及微裂缝属性岩心统计和描述资料,成像测井成果数据,地质小层数据表、储层沉积相和微相研究成果,油井生产动态、注水示踪剂监测资料,生产测井数据,压裂酸化等工艺措施资料,油藏数值模拟成果,井间四维地震技术资料等作为计算数据或约束条件,利用我国地质师、油藏工程师的工作经验及研发的具有针对低渗透油气藏的先进建模技术和方法,建立精细的油藏地质模型,可较为准确地描述出低渗透油气藏中微裂缝的分布位置及规律,表征出低渗透油气藏储层中相对较高渗透率条带,给高效开发低渗透油气藏提供指导。

第三节 碳酸盐岩油气藏

我国储量较大的碳酸盐岩油气田主要分布在四川、渤海湾等盆地。继四川油气田、华北任丘油田等工业规模开发之后,近几年来我国在其他地区的碳酸盐岩地层中也有较好的油气发

现,如鄂尔多斯盆地、塔里木盆地、酒泉盆地、准噶尔盆地等都有一定规模的油气探明储量。

一、储层特性

碳酸盐沉积作用基本上是一种化学作用,其次是生物作用和生物化学作用。控制碳酸盐沉积作用最主要和必要的条件是温暖气候、清洁的水介质和浅水沉积环境。碳酸盐岩在我国分布面积达 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$,占沉积总面积的 55%。从新元古界到三叠系以海相碳酸盐岩为主,中三叠统以上为陆相碎屑岩所夹的湖相碳酸盐岩。

富含天然气的四川盆地及鄂尔多斯盆地的储层是典型的海相碳酸盐岩。四川盆地震旦系—古生界碳酸盐岩天然气储层特点:震旦系储层孔隙度低,渗透率极低,不同构造运动时期的裂缝充填物不完全一样,裂缝在平面上发育不均一,主高点裂缝最发育,边部最差,裂缝渗透率高而空间体积小;川东石炭系碳酸盐岩储层粒间溶孔及粒间孔洞较为发育,裂缝发育,成岩缝弯曲不规则呈网状,大部分被充填,风化缝半充填或未充填具有很好的渗透性,喜马拉雅构造运动缝为张开缝,未充填或半充填,是渗流主要通道;下二叠统一—中二叠统碳酸盐岩储层基质致密,孔隙度平均 0.9%,渗透率小于 0.001mD,原生孔隙基本消失,储层主要为不同成岩阶段的次生孔隙。喜马拉雅构造运动形成的张开缝为主要渗流通道,风化壳古岩溶孔洞也是主要的储集空间,喜马拉雅时期的碳酸盐岩溶洞裂缝系统是中二叠统较为重要的储渗空间,裂缝—洞孔型储层,非均质性强。鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储层的储集类型分为三类:(1)裂缝—溶蚀孔洞型,以圆形和椭圆形孔洞与网状微裂缝相串通,成层性好,厚度稳定,通常大洞连接大缝,小洞连接小缝,主力气层就是这种储层。(2)重结晶晶间孔隙型,储层以晶间孔和晶间溶孔为主,孔与孔之间有短喉连接,储层物性较好,但分布局限,受岩性变化控制。(3)裂缝型,以成岩收缩缝为主。

我国的中生—新生界湖相碳酸盐岩储集空间类型包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝。原生孔隙包括生物骨架、生物体腔、原生粒间、原生粒内孔隙等;次生孔隙包括粒内溶孔、铸模孔、粒间溶孔、晶间溶孔等;裂缝包括成岩收缩缝、构造缝、缝合线、溶蚀缝等。储层可划分为孔隙型、裂缝—孔隙型、微孔隙—裂缝型及裂缝型。

典型的碳酸盐岩储层模型示意图如图 2-3 所示。

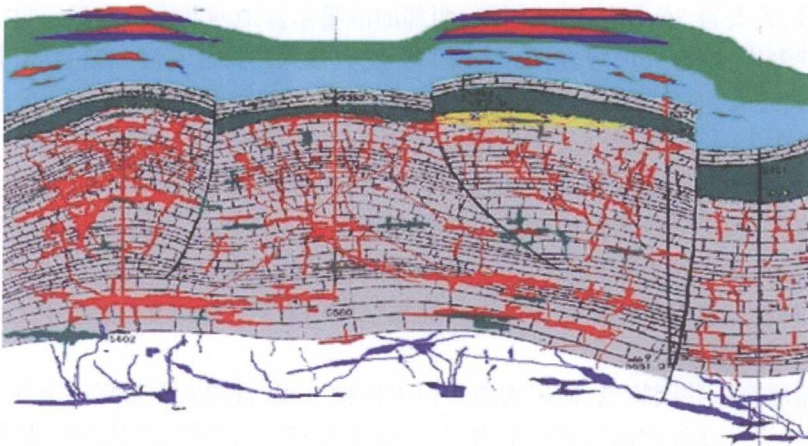


图 2-3 碳酸盐岩储层模式图(图片来自朱怡翔)

二、储层建模研究面临的挑战及应对措施

继四川油气田、任丘油田等工业规模开发之后,近几年来我国在其他地区的碳酸盐岩地层中也有较好的油气发现。其储层建模同样也面临着难题,因为储层控制因素及分布规律预测一直是碳酸盐岩研究的重点和难点,储层储集空间主要以裂缝、溶蚀孔洞等次生孔隙为主。可靠的裂缝、溶蚀孔洞描述分布预测和评价需要碳酸盐岩储层建模技术更加先进。

处理这些难点应对措施之一是:把地震构造解释、储层反演资料,成像测井成果数据,区域地应力研究成果,岩心分析、岩石力学参数研究以及裂缝、溶蚀孔洞属性岩心统计和描述资料,地球物理测井、地质小层数据表、储层沉积相和微相研究成果,油井生产动态、注水示踪剂监测资料,生产测井数据,压裂酸化等工艺措施资料,油藏数值模拟成果,井间四位地震技术资料等作为计算数据或约束条件,利用我国地质师、油藏工程师的工作经验及研发的具有针对碳酸盐岩油气藏的先进建模技术和方法,建立精细的油气藏地质模型,能较准确地表征出碳酸盐岩油气藏中裂缝、溶蚀孔洞等次生孔隙的分布位置及规律,为高效开发碳酸盐岩油气藏提供帮助。

第四节 火山岩油气藏

近几年,我国石油勘探在火山岩储层中相继有较大的油气发现,几乎每个沉积盆地中都有火山岩储层。火山岩储层研究已成为我国复杂储层研究的重点项目之一,其储层建模技术的先进与否直接影响着油气田开发方案的质量。

一、储层特性

我国中—新生代以来频繁的构造运动导致岩浆活动具有多期性的特点,从而在含油气盆地中出现岩石种类多样、形态各异、规模不一的岩浆岩体。尤其地处生油凹陷中或其邻近地区的多孔隙岩浆体更易于形成各类油气藏。例如,东部的松辽盆地徐家围子断陷和长岭断陷营城组火山岩较好的储层为爆发相和溢流相,爆发相形成岩性为凝灰岩、角砾熔岩、火山角砾岩、集块岩等,溢流相形成于火山喷发旋回的中期,是含晶析出物和同生角砾的熔浆在后续喷出物推动和自身重力的共同作用下,沿着地表流动过程中,熔浆逐渐凝固结而形成,溢流相岩性主要为流纹岩、英安岩、安山岩、玄武岩等;西部的准噶尔盆地西北缘石炭纪至早二叠世火山岩岩石类型复杂多样,既有火山熔岩、火山碎屑岩,又有侵入岩,火山碎屑岩包括凝灰岩和火山角砾岩,火山熔岩主要包括安山岩和玄武岩,侵入岩主要包括花岗岩和辉绿岩,火山岩储层储集空间主要包括次生溶孔、裂缝以及少量原生孔隙(晶间孔、砾间孔、残余气孔等),储层以低孔低渗(或特低渗)储层为主,储层非均质性强,其中火山角砾岩和安山岩储层物性相对较好,其次是凝灰岩和玄武岩;渤海湾盆地惠民凹陷临商地区沙一段火山岩储层以火山角砾岩与凝灰岩为主,火山岩储集空间主要为粒间孔、溶蚀孔及构造缝,孔隙结构具有小孔细喉、孔喉连通性与分选性差的特点,火山岩相影响着火山岩储集空间的发育,火山碎屑流相中上部及爆发坍塌相顶部为有利的储集相带。

火山岩储层有一共同特点,储层构造是由事件性沉积所控制,构造形态突变远比砂岩储层严重,其岩相和岩性在陆相油气藏中最为复杂,在喷发、喷溢、冷凝、结晶和构造等因素影响下,火山岩体内形成各种孔隙和裂缝,由孔、缝和洞交织在一起形成诸多类型的储集空间,储层的非均质性极强(图2-4)。