

非均质砂岩油藏 井网优化控制理论与应用

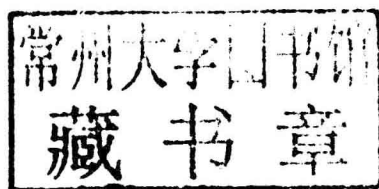
—— 刘德华 著 ——



石油工业出版社

非均质砂岩油藏井网优化 控制理论与应用

刘德华 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书从井网优化控制的地质基础入手,总结了适合非均质砂岩油藏的井网优化控制理论,为非均质砂岩油藏有效开发和二次开发奠定了理论基础,提供了有效改善水驱开发效果的方法和手段。具体内容包括:储层方向性特征及其确定方法,矢量化井网概念及与之对应的合理井网部署方法、实例分析,水平井优化设计与与直井组合的混合井网的设计方法、合理井网密度的确定等。

本书可供从事油田开发研究工作者、油田现场油藏工程师以及油田开发管理人员参考应用,同时可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非均质砂岩油藏井网优化控制理论与应用/刘德华著.

北京:石油工业出版社,2013.12

ISBN 978—7—5021—9909—8

I. 非…

II. 刘…

III. 砂岩油气藏—井网(油气田)—油田开发

IV. ①P618.130.2②TE324

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 291812 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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 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

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15.5

字数:390 千字

定价:69.00 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

长期以来,油气田开发中合理井网的研究一直是人们重视的课题。20 世纪 40 年代,Muskat 对简单井网的渗流机理进行了深入的研究,同时,人们在油层均质和流度比为 1 的条件下,提出了见水时刻油层波及系数与注水方式(即井网形式)之间关系的理论。之后,在 20 世纪 50 年代,人们研究并得到了在任意流度比条件下见水后油层波及系数在水驱油过程中的变化规律。而在 50 年代末,有人倡导“稀井网大压差”生产,并且大规模地付诸实施,但在实践中失败了。60 年代末,谢尔卡乔夫(苏联)提出了油田最终采收率与井网密度的经验公式;与此同时,大庆油田提出了“按油砂体大小布井”的观点,即按油砂体图来统计水驱控制程度与井网的关系。80 年代初,童宪章提出了获得最大产量的井网形式。90 年代初,齐与峰提出了井网系统理论。从 20 世纪 90 年代开始,郎兆新等人开始研究水平井井网的开采问题。2003 年刘德华提出矢量化井网的概念以及相应的布井方法,开始了矢量化井网的研究。2005 年中国石油大学(北京)刘月田研究了各向异性油藏注水开发布井理论与方法。

由以上井网研究发展历程可以看出,随着实践的不断深入,人们对井网的认识也在不断深入。因为井网在油气田的生产中占有相当重要的地位,它的选择、部署和调整在很大程度上决定着油气田的生产规模、开采年限以及油气田企业的经济效益,而且我国陆上油气田大多属于非均质油藏,井网优化问题尤其突出。因此,井网优化控制理论的建立对改善油田开发效果有着重要的指导作用。

随着油气田开发的不断深入,驱替方式的不断变化,油气田开发系统日趋复杂,这就对井网研究提出了更高的要求。从系统角度看,各单井是井网系统的组成部分,井网是油气田开发系统的一个子系统。因此,要想较好地解决井网问题,就应从整体出发,优化单井组合,既要处理好单井的泄油气半径、多井干扰以及注采平衡等问题,又要处理好井网在油气田开发系统和社会复杂巨系统的地位与作用问题。井网的优化始终应遵循布置的总井数最少、控制的泄油气面积最大、最终采收率高、有合理的采油气速度、便于调整以及地面设施和管理费用最低等原则。

本书笔者通过长期从事油田开发理论与应用的研究,特别是油田开发井网的系统研究,结合油田开发实践,提出了井网优化控制理论。

本书撰写过程中得到国家重大专项“剩余油分布综合预测与精细注采结构调整技术(编号 2011ZX05010-002)”的支持,并结合该项目对江苏油田和河南油田

实际情况开展研究以及长江大学油田开发理论与应用项目组成员的大力支持,他们帮助整理完成部分稿件并参与校核工作,参与人主要有关富佳老师、孙敬博士以及蒋明、汪敏、高大鹏、胡伟、杨松等研究生,在此表示衷心感谢,同时也要特别感谢我的家人对顺利完成本书撰写工作的大力支持。

本书主要内容是笔者研究成果的总结,许多内容是首次公开发表,难免存在不足,望读者批评指正。

目 录

第一章 井网优化控制的地质基础.....	(1)
第一节 油藏精细描述概述.....	(1)
第二节 油藏精细描述的主要内容与方法.....	(6)
第三节 油藏非均质性及其定量表征	(14)
第四节 储层非均质性对开发效果及井网的影响	(28)
第二章 储层方向性特征的特征及对开发效果的影响	(35)
第一节 储层方向性特征	(35)
第二节 渗透率分布规律	(40)
第三节 渗透率方向计算与测定方法	(45)
第四节 渗透率方向对开发效果的影响	(53)
第三章 井网优化控制理论	(59)
第一节 注水开发砂岩油藏井网部署特点	(59)
第二节 井网优化控制的概念与方法	(66)
第三节 井网优化控制原则与部署标准	(72)
第四节 影响井网优化控制的因素分析	(76)
第四章 矢量化井网的原理与调整方法	(83)
第一节 矢量化井网概述	(83)
第二节 矢量化井网部署原则	(93)
第三节 矢量化井网设计	(97)
第四节 基于矢量化井网的调整方法.....	(103)
第五章 不同储层特征的井网模式研究.....	(107)
第一节 河道主体沉积微相井网优化研究.....	(107)
第二节 席状砂沉积微相井网优化研究.....	(111)
第三节 不同微相组合布井方式的开发效果分析.....	(115)
第四节 纵向非均质储层油藏井网模式研究.....	(119)
第六章 矢量化井网的应用实例分析.....	(139)
第一节 赵凹油田矢量化井网优化设计与应用.....	(139)
第二节 双河油田Ⅵ油组矢量化井网优化设计与应用.....	(153)
第三节 王龙庄断块矢量化井网优化设计.....	(157)
第四节 不同单元井网优化理论应用效果对比分析.....	(165)

第七章 复杂井网设计优化方法..... (168)

 第一节 复杂井型发展概述..... (168)

 第二节 水平井及其井网优化设计..... (177)

 第三节 裂缝性低渗透储层井网优化设计..... (190)

 第四节 井网设计注意事项..... (204)

第八章 合理井网密度的确定..... (208)

 第一节 井网密度概述..... (208)

 第二节 常规直井井网密度与井距的确定..... (209)

 第三节 低渗透油田技术极限井距的确定..... (223)

 第四节 稠油油藏井网密度的确定..... (230)

参考文献..... (236)

第一章 井网优化控制的地质基础

油田开发过程的方案设计、开发策略、开采措施、提高采收率技术应用、开发调整以及综合治理等各方面都离不开对油藏地质规律的认识和研究,从油田投入开发到结束,油藏描述贯穿全过程,油藏工程师们在不断地认识研究油藏,包括油藏地质、油田开发动态等内容。现代油藏精细描述是油田开发过程中井网优化控制的地质基础。没有精确的储层分布规律及特征认识,井网的部署就没有基础,更谈不上优化井网。本章主要介绍非均质砂岩油藏储层精细描述的基本方法和过程,特别是储层非均质描述方法等,以便弄清与井网优化控制相关的油藏地质特征。

油藏描述的概念与方法首先是 20 世纪 70 年代由斯伦贝谢公司提出的,当时的油藏描述是以测井与地质结合的多井评价为主体。80 年代由于地震处理和解释技术的迅速发展,又提出以地震为主体的油藏描述,随后油藏描述从宏观向微观、从定性描述向定量预测方向发展,90 年代已发展为多学科协同研究的现代油藏描述技术。

20 世纪 80 年代以来,我国引进油藏描述先进技术,在各油田开始以提高高含水油田最终采收率为根本目的,开展了油藏精细描述技术攻关,并进行了大面积的推广和应用,形成了配套技术和成果,同时取得了显著的实际效果。

第一节 油藏精细描述概述

油藏描述是指一个油气田发现后,利用各种可能的资料和手段对油藏地质特征进行全面的综合描述。它经历了由定性到定量的过程,当油田资料非常丰富、储层参数和剩余油预测达到比较精确的程度时,就称为油藏表征。20 世纪 80 年代我国引进有关概念和方法,开始进行油藏描述研究。经过近 30 年的努力,我国油田地质工作者根据资料完善程度和描述的目的,逐步建立了“勘探阶段油藏描述”、“开发初期油藏描述”与“开发中晚期油藏描述”的研究方法,在全国各油田取得了重要成果,并且形成了储量计算、制订开发方案或制订油田开发调整方案等必需的油藏地质研究方法。

一、油藏描述的阶段性

一个油田从发现到废弃,勘探开发工作要经历认识、实践、再认识、再实践的多次反复。每一个步骤均需要用多种手段和资料加深对油藏的认识,这样才能作出进一步调整的措施,取得原油生产的实际效益。依据勘探开发不同阶段占有的地质资料以及需要完成的地质任务,油藏描述的内容和方法具有较大的差异性,所要求达到的目的也就不一样。因此,这里简评一下不同勘探开发阶段的油藏描述。

对于油气勘探开发阶段性的划分国内外基本上差别不大,一般来说,可以分为油田勘探评价阶段、开发初期阶段(方案设计、试采、含水率低于 20%)、中低含水阶段(方案实施、监测、调整阶段,含水率为 20%~60%)以及高含水阶段(三次采油阶段)四个阶段(图 1-1)。其中,油田开发期也对应着开发准备阶段、主体开发阶段和深度开发阶段。

每一个阶段的地质和油藏工程的任务都是充分利用本阶段所取得的油藏信息和资料,对油藏地质特征作出现阶段的认识和评价,目的是为后一阶段采取什么样的开发措施提供地质依据。油藏描述工作的成败直接影响着后一个阶段开发方案的实施和原油产量。当然开发措施的成败不单是取决于油藏地质特征认识的正确程度,还受工程措施是否得当的限制。对关键油藏地质特征的描述和预测越准确,在后一个阶段实践中符合程度越高,说明油藏描述成功率越高。在新的开发阶段,采取积极措施,可以取得更丰富的油藏地质资料和信息,可以用来检验、修改和提高对油藏的认识,所以说油藏描述要随开发阶段而不断深化。

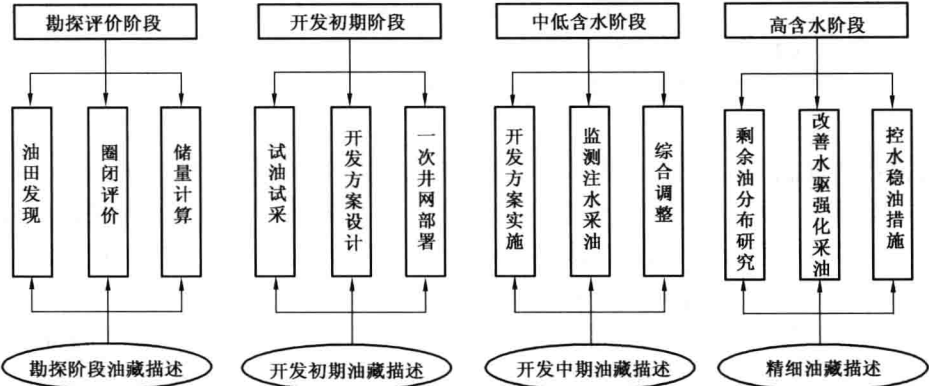


图 1-1 油藏描述阶段划分及其任务

不同阶段的油藏描述虽然有其共同之处,但也有着很大的差别,表现在所拥有基础资料信息的质量、数量以及对油气藏所能控制的程度不同,所要解决的开发问题以及油藏描述的重点和精度也都极不相同。因此,总结国内外油藏描述的经验教训,并结合所开展的油田油藏描述的实际做法,将油藏描述的阶段与勘探开发阶段相对应划分为勘探、开发初期、中低含水期和高含水期四个阶段,或者称为勘探评价阶段、开发初期阶段、中低含水阶段以及高含水阶段的油藏描述。各阶段的划分是相对的,因为勘探是滚动进行的,油藏描述工作也是滚动进行的,不是一成不变的(表 1-1)。

表 1-1 不同开发阶段及其油藏描述的主要任务、技术和方法

开发阶段	勘探开发的任务和内容	油藏描述的任务和内容	油藏描述的技术和方法
勘探评价阶段	(1) 探明地质储量, 预测可采储量; (2) 从技术和经济上对油藏开发进行可行性评价; (3) 预测可能达到的生产规模, 提出规划性的开发部署; (4) 进行钻采和地面工程的轮廓设计	(1) 圈闭参数及圈闭形态的评价; (2) 宏观的油气水系统划分及其控制条件分析; (3) 确定油藏类型; (4) 阐明纵向上储层宏观特征及储层参数特征; (5) 建立油藏构造模型	(1) 以区域地质和地震资料为基础确定油藏构造骨架; (2) 以储层沉积学为基础, 预测砂体空间分布; (3) 地质与地震综合研究为主, 如储层横向预测
开发初期 (方案设计阶段)	(1) 通过试采, 对开发层系、注采井网、采油速度、稳产年限等重大问题进行决策; (2) 进行油藏、钻井、采油和地面建设工程的总体设计; (3) 优选最佳开发方案	(1) 落实可采储量; (2) 核实构造及油、气、水分布; (3) 确定储层沉积微相类型; (4) 预测储层特别是主力储层的宏观分布规律; (5) 建立油藏地质概念模型	(1) 精细地震构造解释技术; (2) 全区小层划分对比统层; (3) 储层沉积微相描述; (4) 测井多井储层评价; (5) 油藏地质概念模型建立技术

续表

开发阶段	勘探开发的任务和内容	油藏描述的任务和内容	油藏描述的技术和方法
中低含水期 (方案实施 调整阶段)	(1)确定注采井别,制订配产配注方案; (2)及时调整开发方案; (3)进行开发动态监测和分析,调整注采关系,实施增产增注措施; (4)分析储量动用、能量保持和利用的现状与潜力; (5)编制有关层系、井网等综合调整方案,并进行实施	(1)测井多井储层评价,提供完善的储层静态参数体; (2)作出各层油、气、水分布图与构造图; (3)全油田小层对比、沉积微相研究,建立储层数据库; (4)储层孔隙结构、黏土矿物等精细研究; (5)综合静态、动态资料,完善储层静态模型,并向预测模型发展	(1)精细的测井多井储层评价技术; (2)储层综合预测和油水分布规律分析; (3)动态监测、油藏数值模拟、综合解释; (4)储层静态模型建立技术
高含水期 (挖潜提高 采收率阶段)	(1)研究剩余油分布与控制因素; (2)开展各种改善水驱油试验,提出控水稳油措施; (3)进行三次采油室内研究和先导试验,推广试验成果; (4)编制三次采油方案	(1)小层微构造和微相研究; (2)流动单元划分与对比; (3)注水开发过程中储层物性动态变化规律研究; (4)剩余油饱和度及其分布研究; (5)建立高含水期油藏动态模型	(1)小层微构造研究技术; (2)流动单元研究技术; (3)水淹层测井解释技术; (4)储层物性动态变化规律研究; (5)油藏三维模型建立技术; (6)地质、油藏、数模一体化技术

1. 勘探评价阶段油藏描述

勘探评价阶段能够获得的资料较少,其中以二维地震资料为主,测线密度为 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 或 $1\text{km} \times 1\text{km}$; 钻井一般只有 1 口或几口探井或评价井的资料,井距在若干千米以上。在综合钻井、测井和地震资料的基础上,可以对油藏进行全面研究和评价,直接为开发可行性研究以及制订开发设计方案提供可靠的地质依据,成功地建立地质概念模型。

油藏描述的主要任务是利用少数探井或评价井的钻井资料以及地震信息资料,以石油地质理论为主导,进行油藏评价、探明地质储量计算以及可采储量预测;讨论评价井的部署,取好各种开发设计参数资料,扩大勘探成果。如果评价区块较小,就要进行开发方式研究和井网部署,对采油工程设施提出建议,并且估算可能达到的生产规模,对设计方案作经济评价,分析开发方案的可行性。

由于油藏勘探阶段的特殊性,其研究任务和内容应着重强调以下八个方面:构造形态、断层、裂缝分布及其发育程度;储层的初步划分与对比,预测储层的岩性、几何形态、侧向连续性以及储层非均质性特征;储层沉积相及成岩史的分析研究;隔层的岩性、物性标准,确定隔层厚度及其空间分布状况;油藏内油、气、水性质及其空间分布的规律性;油藏的压力场、温度场的变化;计算探明石油地质储量;讨论与钻井、开采、储输工艺有关的其他油田地质问题。

上述内容是控制与影响油藏内流体储存和流动的主要因素,从而影响开发过程中各种油藏地质属性的变化。油藏开发地质特征是以表征储层非均质性为核心,可以归纳为三个主要部分:储层的构造特征;储层的建筑格架及其物性的空间分布;储层内流体分布及其性质。

此阶段的油藏描述可提供油藏构造模型,对储层和流体地质模型只能提出一个框架,还达不到概念模型的要求。

2. 开发初期油藏描述

当第一批开发井投入生产、油田综合含水率低于 20% 时, 可以进行开发初期的油藏描述。除了综合地质和地震资料的精细解释外, 需要开展测井多井储层评价, 提供数量较大的储层评价参数体, 并且进行油藏数值模拟, 预测产能和经济效益。此时的油藏描述的目的是建立油藏地质概念模型, 进一步落实探明储量及可采储量, 提出合理的油藏开发方案。

此阶段提供的油藏地质模型主要包括构造模型、储层地质(格架及沉积相)模型以及流体性质模型等。其中, 储层地质模型是油藏地质概念模型的核心部分, 需要对系统取心井进行全面的地质和测井评价。对于其他影响油藏开发决策与措施的地质因素也要进行分析。例如, 是否存在易漏、易喷、易垮塌、易腐蚀、易膨胀的储层, 油藏的压力场、温度场、地应力场分布状况等, 均属于油藏描述的内容。

3. 中低含水期油藏描述

注水开发以后, 综合含水率可能上升很快(含水率为 20%~60%), 各种调整措施不断进行, 第二批开发井也已完成, 井距缩小使油藏大部分部位有井控制。为了有效地建立注采井网系统, 保持油藏最佳开发状态(如增加能量、提高储量动用率等), 最大限度地获得原油产量, 也为了提高油藏最终采收率, 还需要进行油藏描述。

此时的油藏描述应当以测井多井储层评价为主, 提供储层描述的三维数据体, 建立从宏观到微观的储层地质格架、砂体连通性、隔夹层分布、孔隙结构及其储层敏感性等方面的储层三维地质模型, 并且利用油藏数值模拟技术拟合动态生产资料, 给出水驱油波及系数与剩余油分布的数据, 提出纵向上层系调整和平面上注采井网调整的开发方案。可以看出, 此时的油藏描述以储层(静态)精细描述为主, 动态描述为辅, 建立的油藏地质模型是三维的, 具有动态预测的功能。

4. 高含水期精细油藏描述

精细油藏描述与上述描述不同, 它是在开发井网比较完善、油田进入高含水期(综合含水率在 80% 以上), 以测井和油藏动态资料为主进行的油藏描述。高含水期油藏描述的精度要求高, 不仅要建立比较完善的三维油藏地质模型, 还要确定剩余油空间分布, 提出稳油控水的具体措施, 以达到提高采收率的目的。精细油藏描述的详细内容与方法见下一节。

不同阶段油藏描述的主要标志与精度要求见表 1—2。

表 1—2 不同阶段油藏描述的主要标志与精度要求

阶段划分	研究重点					精度要求		
	主要资料	层系划分	沉积相	储层非均质级别	含水阶段	构造研究精度	地质模型	模型网格精度
勘探评价阶段	以 2D 地震为主, 少量探井、评价井	含油层系、油层组	沉积相或沉积亚相	油藏规模(重点)层系规模(平面、层间的)	无水	顶面或标准层 1: 25000 构造图, 描述三级以上断层	构造地质模型	视地震和钻井资料多少而定
开发初期	一次开发井, 可能有先导试验区或三维地震资料	砂层组、小层	沉积亚相或微相	油层规模(平面、层间的)	含水率 < 20%	顶面或标准层 1: 10000 的构造图, 准确确定四级断层	概念地质模型	

续表

阶段划分	研究重点					精度要求		
	主要资料	层系划分	沉积相	储层非均质级别	含水阶段	构造研究精度	地质模型	模型网格精度
中低含水期	开发井网成形,大量测井资料及二次处理结果;开发测井分层测试井生产动态资料	小层	微相	小层规模、单砂体规模	含水率60%~80%	各油层1:10000构造图;构造幅度不小于10m,面积不小于0.3km ² ;断层:断距大于5m,长度不小于300m	静态地质模型	三维网络200m×200m×1.0m
高含水期	完善井网,丰富的动态资料,加密井检查井资料,开发地震资料等	流动单元	成因单元或岩石相	流动单元规模(重点)、层内规模、孔隙规模	含水率>80%	单层顶底面微构造图;构造面积小于0.1km ² 断块;断层:断距小于5m,长度小于100m	三维预测地质模型	三维网络100m×100m×0.2m

总之,不同勘探开发阶段的油藏描述都涉及油藏地质模型、油藏开发方案以及提高采收率措施。总体看,勘探评价阶段油藏描述是建立油藏构造模型和粗略的储层地质概念模型,即将油藏各种地质特征典型化、概念化,抽象成具有代表性的地质模型;而开发初期的油藏描述则要求储层特征和关键性的油藏特征的描述,达到基本符合实际,建立起构造、储层格架、油气水性质的概念模型;中低含水期油藏描述的重点是精细地研究储层各种静态参数,用尽可能多的数据表征储层非均质特征在三维空间的分布规律,建立储层三维地质模型;在高含水期,精细油藏描述则要求利用油藏数值模拟技术动态地预测剩余油分布,建立完善的三维油藏地质模型,为提高采收率提出可行措施,为井网的控制与调整提供可靠的地质依据。

二、油藏精细描述的目的

我国许多老油田是在“会战”年代发现的,当时没有进行油藏描述或细致的油藏地质研究,油田产能建设就大规模开展起来。由于陆相盆地的储层存在严重的非均质性,这些油田在注水开发后综合含水率很快就上升到80%以上,此时油藏地质模型等基本问题还不清楚,严重制约了稳油控水等工艺措施的施行。因此,对油田开展高含水期精细油藏描述,可以解决油田多年存在的油藏地质问题,建立精确的油藏地质模型,搞清楚剩余油分布规律,采取有效的工程措施,从而达到稳油控水、提高采收率的目的。

现代油田开发是以油藏管理为标志,即用好可利用的人力、技术、财力资源,以最小的投资和操作费用,通过优化开发方法,从油藏开发中获得最大的利润。为实现这一目标,必须正确预测油藏地质特征以及不同开发条件下的生产动态,其研究内容主要包括资料采集、油藏描述、驱替机理、油藏模拟、动态预测与开发战略。

只有正确预测储层地质特征和规律,才能做出正确的开发战略决策,优化开发方法。目前,多数人认为油田开发中具有两个技术支柱,即油藏描述和油藏模拟,油藏模拟的数学理论和计算机技术问题已基本解决,而油藏描述虽然取得很大进展,但是油藏地质存在很多不确定性,许多问题还要经过相当长时间的攻关,才能得到相对满意的结果。实践证明,油气田开发

工作成败的关键在于对油气藏的认识是否符合地下客观实际。因此,国内外均把油藏描述放在很重要的位置加以研究,也就是说,油藏管理中搞好油藏描述是很重要的一环。

油藏地质特征复杂多变,不同勘探开发阶段的目的、任务不同,所要重点了解的地质问题就不同。例如,勘探阶段以寻找油藏为目的,圈闭条件评价就重于储层非均质性评价;油田开发阶段则相反,地质研究的任务是了解油藏开发地质特征。油藏开发地质特征是指油藏所具有的控制和影响油气开发过程,同时也影响开发措施的各种地质特征。油藏地质研究是以储层非均质性表征为核心,可以归纳为三个主要部分:

(1)储层构造和建筑格架的描述。储层是由一个或多个储集体构成,以一定的构造形态存在于地下。储集体的几何形态、规模、侧向连接和垂向叠加,以及构造形态、断层、裂缝等构造现象,这些构成了一个或多个可供油气等流体在其内部储存和连续流动的连通体。这些连通体之间由不渗透的岩层和其他遮挡所隔开,圈定这些连通体的外部边界,描述其几何形态和产状,就是储层建筑格架的描述。

(2)储层物性空间分布的描述。储层物性是其含油气性的标志。从宏观的储集体到微观的孔隙结构,储层物性参数在空间上都有不同程度的变化,其内部还存在各种不连续的隔热源,这些构成储层的非均质性和各向异性,很大程度地影响着油气藏的开发效果。

(3)储层内流体性质及其分布。储层含有一定量的烃类才能构成油气藏,或者说,油、气、水三种流体以一定的相态、产状、相互接触关系和储藏量存在于油气藏内,对它们的分析属于储层流体的描述。由于油气生成、运移、储存和埋藏条件千差万别,使得不同的油气藏与一个油气藏内流体性质及其空间变化很大,这也影响着油气开发过程。

与油气藏共存的周边地层的某些属性影响着该油气藏的开发决策与措施。如区域的压力场、温度场、地应力场等分布状况,都应属于油藏描述的附属内容。

总之,开发地质的主要任务是进行油藏描述,储层描述则是油藏描述的核心,油藏描述的任务就是揭示油藏的开发地质特征。油藏开发地质必须从宏观到微观分层次来描述,一般来说,随着油田开发的逐步深入,油藏开发地质特征研究也需要从宏观到微观的层次逐步深入。

精细油藏描述一般是指油藏经过一段时间的注水开发后,综合含水率达到80%以上时,对油藏进行的综合地质、地球物理、油藏数值模拟和油藏工程研究,定量地描绘出储层沉积学、构造地质学、岩石物理学、成岩作用、油藏工程的各种参数。通过建立能够在三维空间反映储层性质与剩余油分布的油藏地质模型,得到储集体及其储集参数在三维空间的定量分布数据体,特别是要得到渗透率和剩余油在油田开发单元中的定量变化规律,为进一步强化采油或开发方案调整提供详细定量的地质依据,从而达到稳油控水的目的。

第二节 油藏精细描述的主要内容与方法

精细油藏描述的一个重要目标就是研究剩余油分布。断块油藏经过长期注水开发,会导致剩余油分散在注入水不易波及的地方,同时注水的清洗作用会导致储层孔隙结构发生变化,因而要定量了解剩余油的分布状态,必须对油藏进行精细描述。由于油藏地质的复杂性,精细油藏描述的内容与方法应当包括:小层精细划分与对比,微构造分析,小层沉积微相研究,流动单元及储层物性预测技术,三维地质模型技术与油藏数值模拟技术等。

一、储层精细划分与对比

储层精细划分与对比,建立合理的地层结构模型(如砂层组、小层、油砂体等)是解决断陷盆地储层纵向非均质性油藏开发的有效方法,也是大庆油田成功的开发经验之一。在精细油藏描述过程中,储层划分对比工作更加深入和细致,因为精细地层模型是油藏微构造、流动单元、储层参数、三维油藏地质模型与油藏工程研究的基础。

1. 小层划分对比的基本原理

断陷盆地的河流、湖泊相沉积在纵向剖面上表现出不同相带的反复叠置现象,或者说以多个沉积旋回表现出来。影响沉积旋回的因素很多,如盆地基底升降、气候干旱湿润变化、冷热变化、周期性的洪水、湖平面的升降与物源供应量变化等,均能导致盆地一定范围内的岩石类型和沉积相带旋回式的变化。这种旋回变化在某一油田范围内往往呈现出规模不同的四级旋回。

(1)一级旋回:相当于一个含油层系,在一个构造带或更大范围内稳定分布;由烃源岩和储集岩组合而成,包含若干油层组的旋回性沉积,一般有微古生物或明显岩性标志层作为旋回界限。

(2)二级旋回:相当于一个油层组(或砂层组),分布在一个局部构造或相邻构造上;由同一沉积体系的储集体组成,常有厚度比较稳定的泥质隔层作为分界线。

(3)三级旋回:相当于一个小层(或砂体),在局部构造或某些断块稳定分布;一般是某一沉积事件形成的储集体,该旋回上下存在泥质隔层,但是隔层的厚度不是很稳定;往往是沉积微相研究的最小沉积单元。

(4)四级旋回:是粒度有变化的一个砂层,或者是单油层,相当于韵律层,一般仅分布在一个局部构造或若干断块范围内,其厚度和沉积性能随砂层的相带位置、层理和结构变化而不同。

1) 储层精细划分的层序地层学原理

开展的储层精细划分基本上是依据高精度层序地层学进行的。层序地层学是研究以不整合面或与之相对应的整合面为边界具有成因联系的旋回岩性序列在研究区及其以外地区的分布规律。

从原理上讲,层序地层学提供了层序和体系域成因地层单元的年代地层格架,它们与特定的沉积体系和油气产出具有密切的联系,有利于生、储、盖组合和储层精细划分,为油藏地质研究打下了坚实基础。

在高含水期油藏描述的层组划分与对比中,应充分运用层序地层学作为沉积旋回和层组划分的基础,而且要利用 Gross 倡导的高分辨率层序地层学理论,依据基准面旋回性与沉积过程的响应关系,确定高分辨层序划分与对比的原则,建立储层格架模型。

(1) 基准面旋回与可容纳空间。

Gross 等人对基准面旋回赋予了时间单元意义,将基准面看做是一个势能面,它反映了地表与沉积过程的不平衡,沉积或侵蚀作用会不断改变地表形态,向更靠近基准面的方向运动。因此,基准面总是有向其幅度的最大值或最小值单向移动的趋势,构成一个完整的上升与下降的旋回(图 1-2)。一个基准面旋回是等时的,在一个基准面旋回变化过程中保存下来的沉积物为一个时间地层单元,即成因层序。

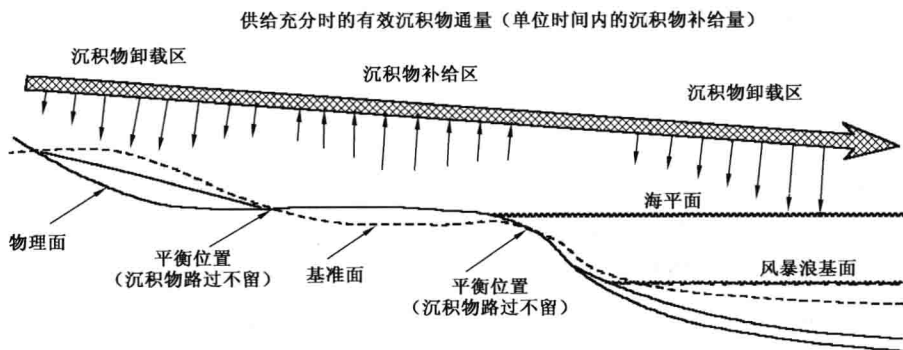


图 1-2 基准面、可容纳空间与沉积供给之间的平衡关系

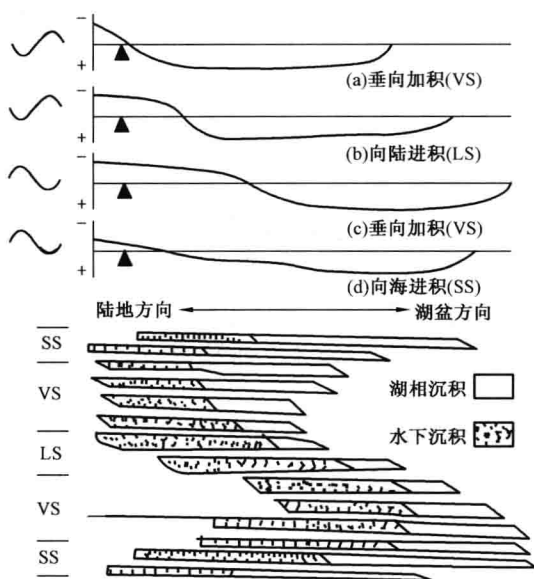


图 1-3 有效可容纳空间迁移及沉积物堆积方式
SS—水退层序; VS—高水位层序; LS—低水位层序

(2) 沉积物分配与相分异原理。

沉积物分配是指层序内沉积物沉积到不同相带的过程,它是由基准面和可容纳空间变化造成的。基准面下降期间,有效可容纳空间位置向海(湖)方向迁移、增大,向陆方向减小,因而滨海砂岩体积逐渐增大,海岩平原沉积体积减小;基准面上升期间,有效可容纳空间位置向陆方向迁移,空间向陆增大,因而堆积在海岸平原相的沉积体积增大(图 1-3)。在长期的基准面旋回中,向盆地方向迁移的进积沉积物形成于基准面下降期间;随后形成的垂向加积地层形成了基准面上阶段;而向陆方向迁移的退积堆积样式出现在基准面快速上升时期。

随着可容纳空间变化和沉积物体积分配,相同沉积环境中的相序、相类型也有显著差异,这一现象称为相分异。

2) 基准面的识别

基准面旋回可以从钻井岩心、岩性剖面和测井曲线上加以识别,并根据旋回的叠加样式确定层序界面。旋回界面的识别标志有以下几种:

(1) 河道冲刷面及河流相沉积物。当基准面下降到地表以下时,发生河流侵蚀作用,形成块状砂岩和河底滞留沉积物。其自然电位、自然伽马呈箱形或钟形,并与下伏沉积物的测井响应为突变接触关系(图 1-4)。

(2) 浅水沉积物直接覆盖在深水之上。这是可容纳空间突然减小,基准面突然下降造成的。其深水沉积物一般为泥质沉积物,而浅水沉积物是相对粗的砂岩沉积。

(3) 垂向剖面上沉积相或相组合转变的位置。如水深向上变浅的相序转变成水深逐渐变深的相序之处就是旋回界面。对应的电测曲线表现为曲线组合形式的转换,如漏斗形、钟形等。

(4) 砂岩、泥岩厚度旋回性变化的位置。层序界面之下,砂岩粒度向上变粗,厚度向上增

大,泥岩厚度向上变小;而层序界面之上则相反。

(5)水深、水体性质及沉积环境的泥岩原生色。这是识别沉积旋回的依据。因为泥岩颜色变浅代表了水体变小,可容纳空间缩小,基准面下降;而泥岩颜色变深,代表了水体变大,可容纳空间增大,基准面上升。

2. 旋回分组对比的技术方法

根据上述高分辨率层序地层学原理,在小层划分对比中应采用“旋回对比、分级控制”的地层对比技术方法,即在标准层控制下的单层对比方法。

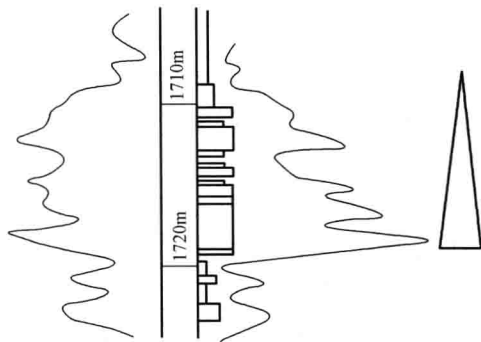


图 1-4 基准面上升旋回的岩性特征

1) 层组划分的步骤

层组划分和对比一般由三个步骤组成:从取心井出发,进行单井沉积旋回分析;通过全油田范围内的反复对比,修改并统一各井旋回初步划分;根据储层及油藏开发地质特征进行适当的调整,给出开发层组的统一划分和对比结果。

2) 单井沉积旋回划分

首先对取心井进行沉积微相分析,再进行沉积旋回划分。然后通过岩电关系分析建立沉积旋回的测井曲线识别特征,对非取心井按测井曲线特征划分沉积旋回。

沉积旋回划分从大而小逐级进行,在上一级旋回划分的基础上研究次一级旋回的划分。一级旋回一般在勘探阶段建立,油田开发中储层划分主要为二级、三级、四级旋回。

(1)二级旋回划分。以一级旋回中不同沉积相带的转变作为二级旋回的界线。如湖盆水退体系域中,从深湖(湖底扇)—浅湖(三角洲)—冲积平原(河流)—冲积扇环境的连续沉积,可以分别划分为 4 个二级旋回。

(2)三级旋回划分。断陷湖盆中一般以局部湖侵事件划分三级旋回,湖侵泥岩底部为界线,即为湖侵开始期。如三角洲沉积,每一个三角洲朵叶体是因局部湖侵而前移的沉积。对于河流沉积,则以一次举世洪泛事件或较长的洪泛间歇期作为三级旋回界线,一般将砂层的底部作为洪泛事件开始处;或者根据河流规模、能量等周期性变化以及古土壤成熟度演化的周期性作为三级旋回划分依据。

(3)四级旋回划分。四级旋回则是对单砂体的划分。如三角洲前缘的河口砂坝中,分流河道砂坝可能是由若干粒度向上变粗或变细的砂层组成,河流每一废弃、改道形成的砂体也是由若干粒度变细的砂层组成。

(4)利用测井曲线进行单井旋回分析。上述取心井进行的沉积旋回划分应当是油田规模储层层系划分的模式,需要通过岩电关系研究及测井相分析,才能利用测井曲线对非取心井进行单井旋回划分。

目前,在测井曲线上识别和划分各级沉积旋回和测井相一般是根据曲线形态特征反映的岩性组合特征分析旋回性。选择代表性测井曲线,掌握其对沉积旋回的响应,是岩电关系研究的一个重要内容。

3) 旋回对比实现统一划分

在单井旋回分析基础上,通过油田范围的对比,调整单井旋回划分,实现全油田的统一。这是一个多次反复的过程,直到实现全油田各级旋回的统一合理划分和等时对比。

(1)建立标准剖面 and 骨架网。

断陷盆地储层的岩性、厚度变化大。一个油田往往跨越不同断块和不同沉积相带,因此,应根据不同沉积类型,分区建立标准剖面。这些标准剖面均匀地分布于油田各个部位,构成了储层层组划分和对比骨架网。通过反复对比,合理调整层组界线,作为控制全油田对比的标准。

(2)确定标准层。

储层对比的准确性很大程度上取决于是否有标志明显且分布稳定的标准层。在陆相盆地中,湖侵泥岩、油页岩、碳酸盐岩、化石层、古土壤层等可作为标准层。

标准层在测井曲线上具有明显响应特征,根据标准层的稳定性及其分布范围可以分为两级:一级标准层为控制构造带范围内的时间地层单元;二级标准层为局部构造的对比标志,或称为辅助标准层。

各组标准层分布的稳定性用稳定率表示:

$$\text{稳定率} = \frac{\text{出现标准层井数}}{\text{统计总井数}} \times 100\% \quad (1-1)$$

4)河流相储层的对比

河流相储层非常复杂,又缺少标准层,对比难度很大,可总结出3种方法。

(1)利用古土壤成熟度进行旋回划分和对比。古土壤是一次河流沉积旋回后期的产物,在下次洪水来临之前已沉积的河流沉积物受到风化作用,若风化时间长,则古土壤成熟度高,容易识别。识别古土壤层可以划分出不同等级的沉积旋回。

(2)切片对比。就是把两个古土壤层间的河流相沉积按总厚度变化趋势任意性地等分或不等分切成若干个层片,切片界线就是对比的等时界线。

(3)等高程对比。河道内的全层序沉积厚度反映了古河流的满岸深度,其顶界反映满岸时的泛滥面。同一河流内河道的沉积物顶面应是等时面,即同一河道沉积,其顶面距标准层(或某一等时面)应有基本相等的高程;相反,不同时期的河道砂体,其顶面高程应不相同。

二、微构造研究

油层微构造不属于传统意义上的构造研究范畴,它们是由砂体沉积的下切作用、差异压实作用以及古地形影响等形成的,与构造作用力无关。微构造研究的目的是阐明沉积单元的顶底形态及其对油、气、水(包括剩余油)运动规律的影响与控制作用,从而指导剩余油开发。

对微构造主要依据钻井资料进行研究。首先需要对研究区逐口井进行海拔高度、补心高度及井斜的校正,然后利用新的小层对比结果,以2m等深线精细地刻划出小层顶底的构造形态。在综合考虑井网条件和其他地质条件的情况下,分析不同的微构造对剩余油分布的控制作用。综合运用单层或合层生产数据、测井技术解释与剩余油饱和度以及油藏数值模拟预测的剩余油饱和度,认识剩余油富集规律与微构造组合之间的内在联系。

1. 微构造形态类型、特征及组合模式

在区域构造背景上,储层单元的顶底常见有高点、鼻状构造、低点沟槽以及斜面等微构造形态。

1)储层微型构造形态类型

(1)高点,指储层顶底形态与周围地形相比相对较高,并且等深值线又闭合的微地貌单元。其幅度差一般为2~4m,闭合面积一般为0.1~0.2km²。