

中国地质大学学术著作出版基金
中国地质大学“211”资源学科群建设项目
联合资助出版

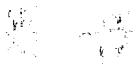
Unconventional oil&gas
reservoirs in continental basins

非常规陆相 油气储层

——以湖相低渗透砂砾岩和
裂缝性白云岩储层为例

姚光庆 孙尚如 周锋德 著

中国地质大学出版社



中国地质大学学术著作出版基金
中国地质大学“211”资源学科群建设项目

联合资助出版

非常规陆相油气储层

Unconventional oil&gas reservoirs in continental basins

——以湖相低渗透砂砾岩和裂缝性白云岩储层为例

姚光庆 孙尚如 周锋德 著

中国地质大学出版社

内 容 提 要

全书共由三部分组成:第一部分主要论述了非常规陆相油气储层基本特征及其表征技术;第二部分主要以新疆宝浪油田为例,论述了煤系粗粒低渗透储层宏观和微观非均质特征以及该类油藏非常规开发特征;第三部分以河南泌阳凹陷白云岩储层为例,论述了裂缝性白云岩储层特征及储层裂缝识别与预测方法。

本书最显著的特点是系统总结了陆相非常规典型油气储层的地质特征及其对油气田开发的直接影响,具有鲜明的陆相特色,资料丰富且来源于具体实例。

本书可供从事非常规油气田勘探与开发的科技人员参考使用,也可供矿产普查与勘探、油气田开发工程等有关专业的高等院校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

非常规陆相油气储层——以湖相低渗透砂砾岩和裂缝性白云岩储层为例/姚光庆,孙尚如,周锋德著. —武汉:中国地质大学出版社,2004. 4

ISBN 7-5625-1894-7

- I. 非…
- II. ①姚…②孙…③周
- III. 非常规储层-陆相-油气
- IV. P618

非常规陆相油气储层

——以湖相低渗透砂砾岩和裂缝性白云岩储层为例

姚光庆 等著

责任编辑:张晓红

技术编辑:阮一飞

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路388号)

邮编:430074

电话:(027)87483101 传真:87481537

E-mail: cbo@cug.edu.cn

开本:787 mm×1092 mm 1/16

字数:250千字 印张:9.5 图版:6

版次:2004年4月第1版

印次:2004年4月第1次印刷

印刷:中国地质大学出版社印刷厂

印数:1—500册

ISBN 7-5625-1894-7/G·621

定价:28.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

油气资源是一种具有重要战略意义的矿产资源,是短期内无法完全被替代的不可再生资源。油气资源将和其他传统矿产资源一样将随不断开采和消费,而逐渐耗尽与枯竭。在 21 世纪,矿产资源的勘探和开发面临的必将是非传统的资源类型,属于难识别、难发现和难开发的非传统矿产资源(nontraditional mineral resources)(赵鹏大,2000)。油气勘探开发也将面临这样的局面,高风险(投入)、差储层、小产能、大深度、低能量、强非均质性等非常规油气藏类型是我们不得不面对的新问题。煤层气(coalbed methane)和天然气水合物(gas hydrate)的勘探和开发是我们不得不面对的新非常规能源。

油气储层是构成油气藏的核心要素,是油气的储集载体。“非常规油气储层(unconventional oil & gas reservoirs)”是相对常规储层类型(通常为中—高渗透率)而言,指储层结构复杂、低—特低渗透性或由于裂缝造成渗透性异常、埋藏较深、油气勘探开发难度较大的一类油气储层,是随着常规油气资源逐渐减少,油气勘探开发难度不断增强,人们不得不面对的一类新的特殊储层。

从原始成因背景上讲,非常规储层包括陆相沉积型、海相沉积型和非沉积型三种储层类型。常见的非常规陆相沉积储层有:粗粒低渗储层、细粒低渗裂缝储层、云(灰)岩—(膏岩)—泥岩类裂缝储层、未成岩松散砂岩储层等类型。海相沉积非常规储层除低渗碎屑岩储层之外,主要是由孔—缝—洞构成主要储集空间的各类碳酸盐储层。非沉积类储集体是由变质岩、岩浆岩等岩类构成的非常规油气储层。赵澄林等(1997)将有关岩浆岩、变质岩、风化壳、煤系和砾岩这类具有特殊储集性能的储层称为“特殊油气储层”。

尽管对非常规油气系统的定义目前还有不同理解,低渗致密砂岩储层、裂缝性细粒碳酸盐岩储层、泥页岩储层等“非常规油气储层”构成的“非常规石油系统(unconventional petroleum systems)”在全球受到人们越来越多的重视(Law and Curtis,2002)。美国 20 世纪 70 年代初期到中期,对常规和非常规资源的区分主要是考虑经济价值因素,次经济和边际价值的煤层气、页岩气和低渗(致密)天然气被大多数勘探地质学家看作非常规资源。但是由于油价和联邦政府资金的激励,这类天然气变成了有经济价值的资源,一些勘探公司也不再把它们看作非常规类型。除了经济因素之外,常规和非常规油气系统在地质概念上有重要区别:常规天然气藏是浮力驱动成藏,表现为在构造或地层圈闭中离散聚集,而非非常规天然气资源通常是非浮力驱动聚集成藏,是区域性弥漫聚集,大多数情况下不受构造和地层圈闭的控制。在美国低渗(致密)气藏天然气、煤层气和页岩气已经占了全美天然气日产量的 26%。与此同时,世界其他国家非常规油气资源的勘探和开发也都进入了快速发展阶段。

目前,我国发现和将要开发的由“非常规油气储层”构成的“非常规油藏”比例大幅增加,学术界和油气公司对“非常规油气藏”的理论研究和勘探开发实践重视程度空前提高。我国在陆相“非常规油气藏”的开发及其“非常规油气储层”研究方面有独特的优势。碎屑岩低渗透储层

和裂缝性碳酸盐岩储层是非常规油气储层的重要类型。我国陆上属低渗透储层的油气未动用探明储量占实际未动用探明总储量的 63.1%，总计为 $23.1 \times 10^8 \text{t}$ (李道品, 1997)。如果把低渗透储层中超稠油藏除外, 其他低渗透储层中的未动用探明储量可占 70% 以上, 可见低渗透储层必将是 21 世纪我们勘探评价和开发面对的主要对象。而陆上裂缝性碳酸盐岩储层虽分布局限, 但其储层特征非常复杂, 储层沉积—成岩—构造改造作用耦合关系的系统表征研究有重要理论和实际意义。在许多陆相盆地中该类储层油藏已越来越多地被发现和开采。作者近年在我国松辽盆地、开鲁盆地、焉耆盆地、泌阳凹陷、鄂尔多斯盆地(陆相部分)、板桥凹陷等陆相盆地中开展了一系列非常规储层综合研究, 取得了一些初步成果。

本书在前人研究和系统文献检索、调研的基础上, 主要结合笔者的科研工作实践, 详细论述了非常规陆相油气储层基本特征、先进表征技术及其油田开发的非常规性。以新疆宝浪油田为例, 讨论煤系粗粒低渗透储层宏观和微观非均质特征以及该类油藏非常规开发特征。以河南泌阳白云岩储层为例, 讨论裂缝性白云岩储层特征及储层裂缝识别与预测技术。笔者试图初步系统总结我国陆相这两种非常规典型油气储层的内在规律性及其对非常规油气田开发的直接影响, 并在这方面试图弥补国内对陆相非常规储层系统研究的缺憾。本书研究内容具有鲜明的陆相特色, 资料丰富且来源于具体实例。相信本书的出版会起到抛砖引玉的作用, 对提高我国非常规油气资源的勘探和开发水平, 以及非常规油气储层研究的进一步深入有所裨益。

本书由姚光庆、孙尚如、周锋德著。王家豪、袁彩萍、曾佐勋、曾小阳、刘斌、张玺科、翟中喜等为主要参著者。全书由姚光庆统稿。参加前期研究人员还有: 罗国平、唐大卿、吴涛、刘洪友、黄郑、杨圆圆、单华生、魏忠元、鲍晓欢等。这里特别感谢中石化河南油田股份分公司李联五总经理和樊中海副总经理对该项研究的大力支持!

陆相碎屑岩低渗储层和湖相白云岩裂缝储层是研究难度较大的非常规油气储层, 许多问题还有待进一步深入研究, 尤其是储层裂缝问题是石油勘探开发领域世界性的难题之一。况且非常规储层评价和表征技术日新月异, 勘探开发实践不断推进, 资料浩如烟海且不断更新。相信随着非常规油气资源勘探开发的不断深入, 人们对非常规油气储层特性的认识定会有重要突破。笔者在编写过程中力图追求完美, 以便满足读者要求, 但由于我们知识水平和实践水平有限, 错误和疏漏在所难免, 敬请读者批评指正!

笔 者

2003 年 8 月 17 日 于武汉

目 录

前言	(III)
----------	---------

第一篇 非常规陆相油气储层基本特征及其表征技术

第一章 非常规陆相油气储层概述	(3)
第一节 非常规油气储层与非常规油气藏(系统)的概念	(3)
第二节 非常规陆相油气储层地质特征综述	(5)
第三节 非常规陆相油气藏一般开发特征	(8)
第二章 非常规陆相油气储层表征技术	(13)
第一节 非常规油气储层研究思路与方法	(13)
第二节 非常规油气储层表征技术	(16)

第二篇 煤系粗粒低渗透油气储层

第三章 煤粒低渗透储层沉积与非均质特征	(27)
第一节 宝浪油田地质概况	(27)
第二节 低渗透砂砾岩储层沉积特征	(29)
第三节 煤系粗碎屑地层高分辨率层序地层	(34)
第四节 砂砾岩储层宏观非均质性	(40)
第四章 煤系粗粒低渗透储层成岩作用及储层岩石物理特征	(44)
第一节 低渗透储层成岩作用	(44)
第二节 低渗透储层自生粘土矿物特征及其对储层特性的影响	(50)
第三节 低渗透储层物性特征	(54)
第四节 低渗透储层孔隙结构	(56)
第五节 低渗透储层流体渗流规律	(61)
第五章 煤系粗粒低渗透油田开发特征与增产措施	(66)
第一节 宝浪低渗透油田开发特征	(66)
第二节 宝浪低渗透油田开发原则	(67)
第三节 增产措施与效果分析	(70)

第三篇 湖相白云岩裂缝性油气储层

第六章 湖相白云岩储层沉积学及层序地层学特征	(79)
第一节 泌阳凹陷白云岩层系地质概况	(79)
第二节 白云岩储层沉积学特征	(81)
第三节 白云岩储层层序地层学特征	(87)
第七章 湖相白云岩储层岩石学与成岩作用	(92)
第一节 白云岩储层岩石学特征	(92)
第二节 白云岩储层成岩作用	(95)
第三节 白云岩储层物性特征	(100)
第八章 湖相白云岩裂缝性储层识别与表征	(103)
第一节 白云岩储层裂缝类型与成因	(103)
第二节 白云岩储层溶孔-裂缝直接识别方法	(106)
第三节 白云岩储层溶孔-裂缝间接识别方法	(112)
第九章 湖相白云岩储层裂缝数学模拟及预测	(116)
第一节 构造曲率法裂缝预测	(116)
第二节 构造应力场模拟计算方法裂缝预测	(118)
第十章 湖相白云岩有利储层展布及含油性评价	(130)
第一节 白云岩有利储集体划分	(130)
第二节 白云岩储层等级划分	(132)
第三节 白云岩储层含油性评价	(135)
主要参考文献	(139)
图版说明及图版	(145)

第一篇 非常规陆相油气储层

基本特征及其表征技术

第一章 非常规陆相油气储层概述

第一节 非常规油气储层与非常规油气藏(系统)的概念

“常规”与“非常规”、“传统”与“非传统”是一个随时间变化的动态概念。这里我们讨论当今油气资源勘探开发中“常规”与“非常规”、“传统”与“非传统”的问题。众所周知,人类社会要在 21 世纪实现并保持社会经济的可持续发展,人口、资源和环境是必须解决好的三大重要课题。而各类新型矿产资源的发现、开发和利用是解决人口、环境等敏感问题,实现社会进步,尤其是实现经济腾飞的关键制约因素。目前,在还没有适当的可替代能源情况下,油气资源的开发利用仍是当今,乃至今后 30~50 年,保持社会文明和进步的关键因素。而油气资源的勘探、开发和利用涉及高技术含量越来越大,非常规或非传统油气资源类型越来越普遍。因此,正确认识和理解非常规油气资源,合理开发和利用非常规油气资源具有十分重要的现实意义。

下面简单介绍一下与“非常规油气资源”有关的一些新理论和新概念。

一、非传统矿产资源

非传统矿产资源(nontraditional mineral resources)是指受目前技术、经济以及环境因素的限制尚未被认识、发现或未能开发利用的矿产资源(赵鹏大、陈建平,2000)。非传统矿产资源体系包括非传统矿产—非传统方法—非传统矿业—非传统矿产经济四个方面。非传统矿产资源的发现与开发具有重大的经济、社会、环境与资源效应,是社会可持续发展和缓解传统矿产资源供给紧缺局面的重要基础之一。因此,以新理论、新技术和新方法进行发现与开发新类型、新领域、新深度、新工艺、新用途非传统矿产资源的基础研究是十分重要的学科前沿领域(赵鹏大、陈建平,2000)。“非传统矿产资源”概念强调了超前认识、发现或开发利用新矿产资源的重要性。

例如:“斑岩铜矿”是现今世界上最重要的铜矿工业类型,在 20 世纪初(1917 年)刚被发现时被称之为“胚胎矿”而不能加以利用,是昔日的“非传统”矿(赵鹏大、陈建平,2000)。可见,非传统矿产资源是一个动态概念,随着技术、经济、环境、市场及需求的变化,它可能转化为传统矿产资源。现今的煤层气(coalbed methane)和天然气水合物(gas hydrate)等“非传统”资源,必将是未来 10~20 年后重要的“当家”能源类型而广泛加以应用。

二、非常规油气系统

对非常规油气系统(unconventional petroleum systems)的定义目前人们有不同理解。20 世纪 70 年代初期到中期,美国对常规和非常规资源的区分主要是考虑经济价值因素,次经济和边际价值的煤层气、页岩气和低渗(致密)天然气被大多数勘探地质学家看作非常规资源。但是在 20 世纪 70 年代末,由于油价和联邦政府资金的激励,这类天然气变成了有经济价值的资源,一些勘探公司也不再把它们看作非常规类型。除了经济因素之外,常规和非常规油气系统在地质概念上的重要区别之处是:常规天然气藏是浮力驱动成藏,表现为在构造或地层圈闭中

离散聚集,而非常规天然气资源通常是非浮力驱动聚集成藏,是区域性弥漫聚集,大多数情况下不受构造和地层圈闭的控制(Law and Curtis,2002)。“非常规油气系统”这一概念强调发现和勘探非常规天然气资源的重要性。低渗(致密)深盆气藏天然气、煤层气和页岩气系统是典型的非常规油气系统。

三、非常规油气储层

相对常规陆相储层类型(通常为中—高渗透率)而言,非常规油气储层(unconventional oil & gas reservoirs)指储层结构复杂、低—特低渗透性或由于裂缝造成渗透性异常、埋藏较深、油气勘探开发难度较大的一类地下油气储层,是随着常规油气资源逐渐减少,油气勘探开发程度不断增强,人们不得不面对的一类新的特殊储层。从原始成因背景上讲,非常规储层应包括陆相沉积、海相沉积和非沉积三种储层类型。常见的陆相沉积非常规储层有:粗粒低渗储层、细粒低渗裂缝储层、云(灰)岩—膏岩—泥岩类裂缝储层等类型。海相沉积非常规储层主要是由孔—缝—洞构成主要储集空间的各类碳酸盐储层和细粒低渗储层乃至泥质岩类储层;非沉积储集体是由变质岩、火成岩等岩类构成的非常规油气储层。这一概念强调复杂油气储集岩体的识别、表征、预测在油气田开发中的重要性。非常规油气储层的共同特点是储层本身都具有低渗透、特低渗透或非渗透(基质块部分)特征,裂缝在一些非常规储层中占主导作用。

随着油田开发技术的发展,低渗透储层的标准也在不断演化。20世纪80年代一般把渗透率小于或等于 $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为界限(罗蛰潭、王允诚,1986)。目前,我国以储层渗透率小于或等于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为判定低渗透砂岩油藏的标准(裘怿楠等,1998),渗透率小于或等于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为特低渗透率油藏标准,这一标准与欧美等国家对于储层评价的标准是统一的。

低渗透油层的下限截止值也是一个相对的概念,20世纪80年代以来,国内外普遍把大于或等于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为特低渗油藏的下限标准,并用此值来计算石油地质储量。随着非常规油气资源的勘探和开发,带来了新的技术革命,突破了传统的一些概念,如砂岩储层物性下限截止值标准在一些非常规气藏储层中下移($< 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。这些突破开辟了新的勘探前沿领域,扩大了勘探空间,增加了油气地质储量(Law and Curtis,2002)。

四、非常规油气藏

笔者从油气田开发技术角度来界定“常规油气藏”和“非常规油气藏”。应用常规开发措施有效开发的油气藏属常规油气藏,而必须应用非常规开发工艺技术才能有效开发的油气藏就属于“非常规油气藏(unconventional oil & gas pools)”。从油气藏本身特征看,“非常规油气储层”构成的油气藏和(或)“油气水流体分布异常”的油气藏统称为“非常规油气藏”。包括两层含义:

第一,“非常规油气储层”构成的油气藏强调储层的非常规性,即低渗、特低渗储层或由裂缝改造的储层类型,其油层中油、气、水分布可以是正常状态,也可以是异常状态。如深盆气藏(basin-centered gas pool)就是气水分布异常的非常规气藏类型。

第二,由常规储层构成的“油气水流体分布异常”的油气藏,特指中晚期开发阶段剩余油分布高度分散的高含水油田。这类油藏面临应用综合方法提高最终采收率、降低含水率的难题。在我国东部地区,大部分第三系油田进入高含水开发阶段,剩余油分布异常分散,油水分布规律性差,油藏类型属于油水分布异常类型的非常规油藏。

五、边际性油气田

按商业开发价值,地下油气藏可归属三个级别:“商业性的”、“边际性的”或“非商业性的”。

具体将取决于经济、技术和政治等许多综合性因素,而和油田的大小没有直接关系。这三个术语的定义如下(D. A. 菲,1986):

商业性的油气田——这一级油气田的发展前景是,石油公司在采用常规技术进行开发的条件下,经济上可获有吸引力的盈利率。

非商业性的油气田——这一级油气田的发展前景是,石油公司在可预见的技术和财政情况下无法获得经济效益。

边际性的油气田(marginal oil or gas field)——这一级油气田的发展前景是,石油公司只有在选用改进的技术和(或)资金方案的条件下才能获得经济效益。强调油气田开发现行的商业价值,受技术、资金、政治、经济、军事、气候等自然和人为因素控制。这一概念是随社会发展而变化的动态概念。

第二节 非常规陆相油气储层地质特征综述

非常规陆相油气储层的类型是多种多样的,但其基本地质特征普遍表现为储层低孔、低渗、强非均质性、高粘土矿物含量、基质渗透率极低、裂缝发育、强敏感性等特点(袁明生等,2000)。从非常规储层形成过程看,储层沉积、成岩和后期改造等综合因素的联合作用是造成储层非常规的根本原因,这一过程是地质作用长期演化的结果。

一、非常规陆相储层分类

1. 按岩性分类

粗粒砂砾岩储层、细粒粉砂岩储层、泥(页)岩储层、(泥)灰岩储层、(泥质)白云岩储层等岩性都可以构成陆相非常规储层。

2. 按成因分类

从沉积学角度包括近源快速(物源供给丰富)沉积、远源细粒(物源供给匮乏)沉积、化学沉积等成因类型。从成岩角度包括强压实及强胶结成岩作用、化学溶蚀作用、储层裂缝改造作用等成因类型。

3. 按孔渗和裂缝发育程度分类

非常规储层中,孔隙、裂缝、溶孔(洞)是常见的三类储层空隙空间介质,按它们在储层中的发育相对程度,可分为:低渗储层、特低渗储层、低渗-裂缝储层、裂缝储层、溶孔-裂缝储层、裂缝-溶孔(洞)六类储层类型。

4. 综合分类法

笔者采用“岩性+储集空间类型”的分类法来命名陆相非常规油气储层。常见的主要有以下4种类型:粗粒低渗透砂砾岩储层、细粒致密砂岩储层、云(灰)岩类溶孔-裂缝储层、泥(页)岩类裂缝储层(表1-1)。

二、粗粒低渗砂砾岩储层基本特征

砂砾岩粗碎屑低渗—特低渗非常规储层在我国西部地区广泛发育,东部中生代盆地也有发育。该类储层与煤系地层伴生是其一个重要特点,并对储层成岩作用产生特殊影响。此类储层孔隙度平均小于15%,渗透率平均小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。岩性混杂,砂砾岩为主,厚度较大,多为冲积扇、扇三角洲、辫状河河道沉积。岩石成分成熟度和结构成熟度低,岩屑含量高。岩石普

表 1-1 陆相非常规油气储层类型及其地质特征

类 型	主 要 特 征	成 因 解 释	备 注
粗粒低渗透砂砾岩储层	以砂砾岩岩性为主,混杂近源沉积,多与煤系地层伴生。孔隙结构复杂,表现为多峰态结构。成岩矿物高岭石十分发育。储层改造措施效果差异大,储层普遍塑性性质	陆相近源辫状河或冲积扇沉积	宝浪、丘陵、大牛地、科尔沁油田为代表
细粒致密砂岩储层	储层为细粒远源沉积。压实、胶结等成岩作用普遍强烈。储层普遍特低渗,孔隙结构复杂。储层粘土矿物含量相对较高,储层敏感性较强	陆相远源河流—三角洲沉积体系,湖相滨浅湖碎屑体系	安塞、新民、扶余、马西油田为代表
云(灰)岩类溶孔-裂缝储层	储层为粒间孔、溶孔、溶洞、裂缝四种空隙介质并存,结构复杂。裂缝是储层主导因素。圈闭与一定构造背景相对应。压裂、酸化投产效果较好	滨浅湖碳酸盐岩沉积体系或较深湖蒸发岩系列沉积	邵家 4 井区、板桥油田、泌阳云 2 井区、狮子沟油田为代表
泥(页)岩类裂缝储层	裂缝系统是储层核心要素。岩性层属性(岩性、厚度、成分等)控制裂缝发育。初期高产,但产能下降极快,油藏规模不确定性强	浅湖—深湖相沉积封闭湖湾体系	王场油田为代表

遍经历强成岩压实作用和强粘土矿物(以高岭石为主)胶结交代作用,同时长石类矿物强烈交代蚀变,致使岩石在致密的基础上又有孔隙结构的强烈非均质性。受砂砾岩塑性性质影响,储层裂缝系统不起主导作用。油田压裂开发效果不佳。综合其特点主要有:① 砂砾岩岩性,混杂近源沉积,多与煤系地层伴生;② 物性构成复杂,受储层结构非均质性控制;③ 孔隙结构复杂,表现为多峰态结构;④ 成岩矿物高岭石十分发育,煤系成岩环境独特;⑤ 储层压裂和酸化等改造措施效果差异大,储层普遍具塑性性质;⑥ 夹层、隔层受微相控制,分布复杂。

三、细粒致密砂岩储层基本特征

粉细砂岩低渗细粒储层非常规储层在东部和西部中生代盆地广泛发育,埋藏较深,储层高泥质含量多伴有大量裂缝存在。新民油田扶余油层为例,储层泥质含量达 15%;孔隙度平均 14.5%;渗透率平均 $0.84 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。沉积体系主要是远源三角洲、河流以及水下重力流体系。储层裂缝发育,受叠加应力场的控制裂缝多期次发育,可以沿一个方向形成优势,控制注水水淹方向或渗透性优势方向。储层细粒成岩作用强,除压实强烈外,碳酸盐岩胶结现象普遍,粘土矿物以伊利石为主,反应演化程度较高。油田压裂和酸化效果较好。综合其特点主要有:① 储层为细粒远源沉积;② 压实、胶结等成岩作用普遍强烈;③ 储层普遍特低渗、孔隙结构复杂;④ 开发中后期普遍伴有明显的原始地层裂缝存在;⑤ 储层粘土矿物含量相对较高,储层敏感性较强;⑥ 压裂改造是提高产能的主要手段。

四、泥(页)岩类裂缝储层基本特征

泥(页)岩是由颗粒很细的碎屑岩(颗粒直径小于 0.05mm)组成的致密岩石,岩石本身物性极差,没有任何储集和渗透能力。强烈发育的各类裂缝(层间缝、构造缝、成岩缝等)是构成有效泥(页)岩储层的关键因素。

国外已发现有非常可观的天然气储量来自泥(页)岩类裂缝储层之中。例如,截至 2002 年,美国有 5 个油气高产泥(页)岩储层区(Lewis 页岩;Barnett 页岩;New Albany 页岩;Ohio 页岩;Antrim 页岩),天然气产量达 107.54 亿 m^3 (Hill and Nelson, 2000)(图 1-1)。加利福尼亚

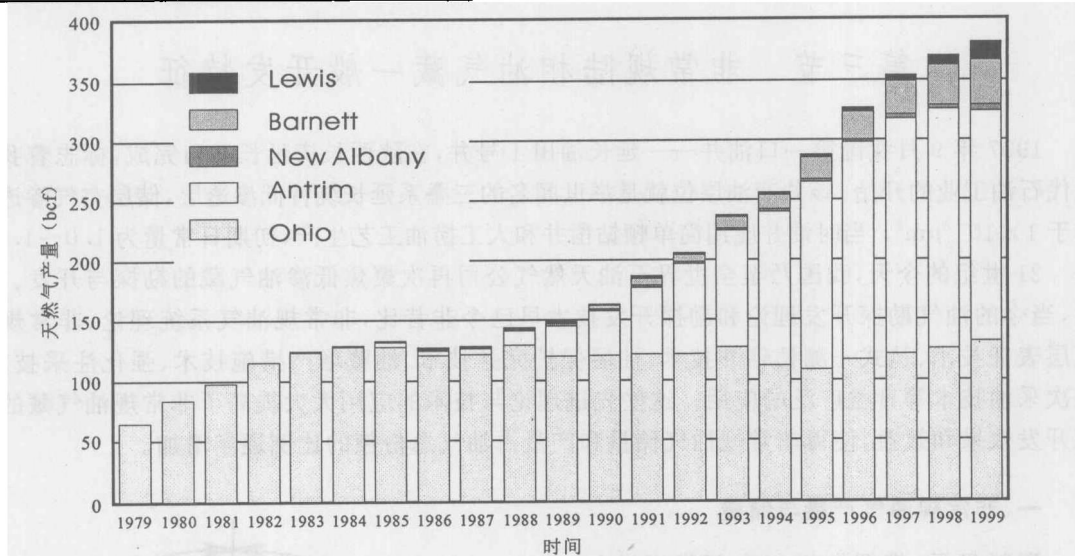


图 1-1 1979—1999 年美国 5 个页岩含气系统天然气产量图(Hill and Nelson, 2000)

湾中新统蒙特雷组页岩层可采石油储量 4 800 万~8 000 万 m^3 ；阿巴拉契亚盆地泥盆系页岩估计天然气地质储量 240 000 亿~310 000 亿 m^3 。俄罗斯西西伯利亚沥青质泥岩储层产油，油藏压力系数高达 1.45~1.60(袁明生等, 2000)。

我国泥(页)岩类油气藏迄今为止所见不多,但在陆相盆地油气钻井中时常会在泥(页)岩中发现油气显示或油气流,潜江凹陷和沾化凹陷等地区钻井都有钻遇此类储层的油气流发现。潜江凹陷王场油田存在典型的泥岩裂缝性油藏,并且单井累积产油 7 834t,并有大量天然气产出(袁明生等, 2000)。

综合其特点主要有:① 裂缝系统为绝对导流和储集空间介质,是储层核心要素;② 岩性层属性(岩性、厚度、成分等)控制裂缝发育;③ 在初期,一般为高压油气藏;④ 注水受效差,流体流动难以控制;⑤ 初期高产,但产能下降极快、油藏规模不确定性强;⑥ 储层易受伤害,保护措施难度大。

泥(页)岩类油气储层无论其宏观裂缝特征还是微观孔渗特征都十分复杂,有效储层受多方面因素的影响(主要是构造、岩性、成岩、地层压力等因素),在横向上有复杂多变性和难以预测的特点。

五、云(灰)岩溶孔-裂缝储层基本特征

与海相碳酸盐岩储层结构类似,云(灰)岩溶孔-裂缝储层结构相对更复杂、质量更差、规模更小。我国陆上板桥凹陷、东营凹陷、沾化凹陷等盆地发育灰岩储层。邵家 4 井区(灰岩、泥灰岩)、泌阳云 2 井区、青海柴达木盆地狮子沟油藏(泥质灰岩)为此类储层的代表。陆相灰岩和白云岩一般泥质含量较高,极少有颗粒碎屑灰岩,大部分储层如果没有裂缝和溶洞的改造,均表现为非有效储层。对这类储层的认识关键是对裂缝-溶孔发育带的认识,沉积微相和成岩作用关系研究是认识基础,精细层序地层分析和构造应力场分析是理论指导。这类储层的空间预测离不开一些先进测井技术的应用。综合其特点主要有:① 储层为粒间孔、溶孔、溶洞、裂缝四种空隙介质并存,结构复杂;② 裂缝是储层主导因素;③ 有效储层层薄,夹层岩性发育;④ 圈闭与一定构造背景相对应;⑤ 压裂、酸化投产效果较好;⑥ 产量不稳定,下降快,水淹快。

第三节 非常规陆相油气藏一般开发特征

1907年9月我国第一口油井——延长油田1号井,在陕西长庆延长油田完成,标志着我国现代石油工业的开始。该井产油层位就是举世闻名的三叠系延长统特低渗透层,储层空气渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。当时油井应用简单顿钻凿井和人工捞油工艺生产,初期日常量为1.0~1.5t。

21世纪的今天,我国乃至全世界石油天然气公司再次聚焦低渗油气藏的勘探与开发。当然,当今的油气勘探开发理论和勘探开发技术早已今非昔比,非常规油气系统理论、非常规油气层表征技术、丛式一测钻钻井技术、油层保护完井技术、油藏增产措施技术、强化注采技术、三次采油技术等日益广泛的应用。这些先进理论与技术的应用大大提高了非常规油气藏的勘探开发效果和效益,使得非常规油气储量和产量占油气总份额的比例逐年增加。

一、非常规油气产量与储量

资料显示,俄罗斯近年来新发现油气田中非常规油藏的比例越来越大,在西西伯利亚地区低渗、薄层等低效储量占到探明储量的50%以上。

AAPG非常规油气系统(UPS)研究组指出,目前到2020年,美国天然气预计将是能源消耗中增长最快的类型,会由1999年2.38万亿 m^3 ,激增至2020年的4.58万亿 m^3 。在美国低渗(致密)气藏天然气、煤层气和页岩气已经占了全美天然气日产量的26%。

我国陆上属低渗透储层的油气未动用探明储量占实际未动用探明总储量的63.1%,总计为 $23.1 \times 10^8 \text{t}$ (李道品等,1997)。如果把超稠油除外,低渗透储层的未动用探明储量占70%以上,可见低渗透储层必将是21世纪我们勘探评价和开发面对的主要对象(图1-2)。统计资料显示,我国各个油区广泛分布低渗透储层,有的油区低渗透储层为主力油层,尤其是中西部地区低渗透油层占油区储量50%~100%不等(表1-2)。

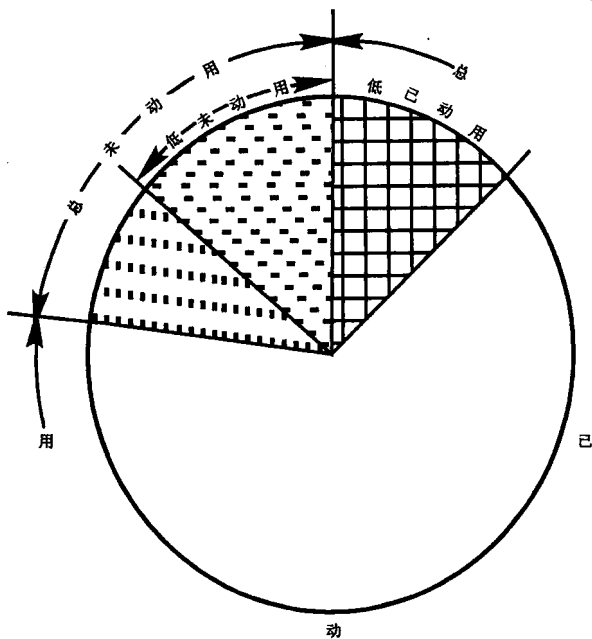


图 1-2 我国低渗透油田储量占总储量比例图(李道品等,1997)

我国各个油区广泛分布低渗透储层,有的油区低渗透储层为主力油层,尤其是中西部地区低渗透油层占油区储量50%~100%不等(表1-2)。

二、非常规油气田开发特征及主要对策

由于非常规油气藏高风险(投入)、差储层、低丰度、小产能、大深度、低能量、强非均质性的特点,致使非常规陆相油气藏在开发方案、开采方式、开发技术等方面与常规油藏开发特征存在明显的不同。主要表现在以下6个方面(罗迪强,1997)。

1. 自然产能低,生产压差大,压裂后增产幅度较大

由于非常规储层普遍低渗透性、岩性致密、孔喉半径小、渗流阻力大,因而自然导致油井自然产能低,生产压差大。我国部分已开发的低渗油田单井自然产能一般日产小于5t,在特低渗

表 1-2 我国低渗透油田(藏)储量数据表(据李道品等,1997)

区号	油田或油区	地质储量 (10 ⁴ t)	可采储量 (10 ⁴ t)	动用储量 (10 ⁴ t)	占油区储量 (%)	占全国低渗透储量 (%)
1	大庆	58 274	9 423	16 864	11.27	14.62
2	吉林	37 588	7 769.84	10 431	61.18	9.43
3	辽河	35 446	7 007.5	25 138	21.16	8.89
4	华北	15 615	2 226.3	8 379	18.74	3.92
5	二连	7 452	910.4	5 573	53.28	1.87
6	大港	24 574	4 997.2	10 641	33.89	6.16
7	冀东	620	105.6	246	5.38	0.16
8	胜利	48 982	10 818.1	33 767	14.76	12.28
9	中原	23 719	6 249.9	11 422	35.36	5.95
10	河南	326	45.7	128	1.88	0.09
11	江汉	2 592	689.7	1 887.5	26.51	0.65
12	江苏	2 950	361.5	2 080.9	33.09	0.74
13	新疆	62 413	13 284.2	38 184	44.98	15.65
14	塔里木	1 613	416	1 155	7	0.4
15	吐哈	16 353	5 223	3 860	85.19	4.1
16	青海	8 445	1 330.4	2 734	44.92	2.12
17	玉门	3 422	1 854.5	5 421.8	60.2	1.36
18	长庆	20 372	4 207.9	10 507.8	67.69	5.11
19	延长	22 858.9	2 162.4	2 995	100	5.73
20	滇黔桂	693	94.5	273	38.37	0.17
21	四川	2 413	241	2 413	100	0.61

地层中,产能则更低,甚至在自然状态下完全没有产能。如,鄂尔多斯盆地大牛地致密气田、松辽盆地新民油田、沾化凹陷渤南油田等非常规油田在自然状态下开采单井产能接近零。这类油气田必须经过压裂改造后才能形成产能。当然,采取压裂工艺措施必须经过细致科学的分析论证,必须适合本油气田的储层性质,照搬其他油田的方法往往不会收到好的效果。

2. 利用天然能量开采,产量递减快,压力下降快,一次采收率低

许多裂缝性油气藏和低渗透油气藏,在采用消耗式开采时普遍产量递减快,压力下降快,一次采收率低。据统计,在依靠天然能量开采阶段,低渗油田年递减率一般在 25%~45%之间,在松辽盆地南部油田最高甚至达 60%。地层压力每采出 1%的地质储量下降 3.2~4.0MPa。为此,对非常规油田而言,尽快采取注水措施来保持油藏地层压力显得非常重要且非常急迫。

3. 注水井吸水能力低,启动压力和注水压力高

注水井吸水能力低,启动压力和注水压力高,是低渗油田注水开发过程中的一个普遍矛

盾。随着注水时间的延长,或油藏的污染加重,这一矛盾会加剧,甚至发展到注不进水的地步。当然,注采井距偏大、油层连通性差,也是注水井吸水能力低和注水压力高的重要原因。因此,实际工作中,应考虑综合因素解决这一突出矛盾。

4. 油井注水见效较慢,压力、产量变化不够敏感

油田见注水效果的早晚,首先受油层导流能力(厚度和渗透率)的控制,同时受注采井距大小、注水强度、注采比、油层连通程度等因素控制。相对常规储层而言,低渗储层油藏油井注水见效较慢,压力、产量变化不够敏感,有的甚至恢复不到油井投产初期的水平。

5. 储层中开启和连通的裂缝吸水能力强,油井水窜严重

泥岩类、碳酸盐岩类非常规储层,甚至包括多数致密低渗砂岩储层,原始裂缝普遍比较发育。在油气田开发过程中,油藏增产措施的实施,也会产生人工压裂裂缝。储层中不论是原始天然裂缝,还是人工压裂裂缝,都有利于流体流动和驱油效果,但都会造成与裂缝沟通注水井吸水能力强,油井水窜严重的问题。对裂缝性低渗砂岩油藏,值得注意的是恢复压力不能过快,注水压力、注采比不能太大,防止注水沿储层裂缝水窜。

6. 见水后采液指数大幅度下降,稳产难度大

据统计,在生产压差不变的情况下,当含水 60% 时,低渗透油田油井产液量要下降 60%,产量下降 85%;而高渗透油田油井产液量反而上升 75%,产油量仅下降 25%。对低渗透油田而言,低含水阶段含水上升较慢,是重要产油期,应在本期尽量多产油。

针对上述非常规油藏的开发特征,在实施开发过程中应根据实际情况制订切实可行的开发对策,尽最大努力提高油气田的开发效果。具体应考虑采取的主要对策包括:

(1) 选用合理的注入剂,尽早补充能量:在开发早期增加油藏地层能量,补充油藏自然能量的亏空,来提高产能。注水开发是最普遍采用的有效措施,成本低廉,且效果较好。另外,注气开发也是一些油气藏的有效选择。

(2) 合理制定增产措施:根据油田实际,尽早确定增产措施方案,确保措施成功见效。对于碳酸盐岩储层一般要靠考虑酸压措施;对于细粒低渗储层要考虑水力压裂或气体压裂、酸化等措施;对于粗粒低渗储层可考虑水力压裂或气体压裂、酸压等措施。

在酸溶性地层诸如白云岩和石灰岩地层采用酸压(一般用盐酸)代替支撑压裂,酸压与支撑压裂的主要区别在于前者是通过酸蚀裂缝面而不是支撑裂缝获得导流能力。

酸压技术 1932 年首次用于石灰岩地层的增产改造,并获得成功,很快成为受欢迎的碳酸盐岩地层的增产方法(Jack Elbel, Larry Britt, 2000)。加砂压裂和酸压对比:对碳酸盐岩或白云岩地层的增产改造,用加砂压裂或酸压都有其优点与局限性,但首选是酸压方式。通常,酸蚀裂缝穿透有限但导流能力强,而加砂压裂穿透距离远但导流能力有限。对比而言,酸压的优缺点如表 1-3 所示。

表 1-3 酸压与水力支撑压裂的优缺点比较(Jack Elbel, Larry Britt, 2000)

酸压优点	酸压缺点
净压力低,裂缝高度增长小	高滤失限制了酸蚀裂缝的穿透距离
能获得高导流效果	温度影响酸蚀产生裂缝的能力
无脱砂之风险	油井中潜在乳化和软泥问题
无支撑剂回流的问题	酸蚀导流能力难以预测
	环境污染问题