

杨华 席胜利 魏新善 陈义才◎著

# 鄂尔多斯盆地

大面积致密砂岩气成藏理论



科学出版社

# 鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩气成藏理论

杨 华 席胜利 魏新善 陈义才 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书以鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气实际资料为依据,在综合分析大面积致密砂岩气成藏物质聚集与分布基础上,结合生烃模拟、水槽沉积模拟、成岩模拟实验,研究致密砂岩气充注方式、充注时期、地层压力系统形成演化及致密砂岩气富集成藏机理。在此基础上,建立致密砂岩气的气-水分布模式和近距离充注成藏模式,并以典型致密砂岩气田勘探实例解剖,总结致密砂岩气藏分布规律,预测致密砂岩气的勘探潜力及潜在有利分布区。

本书可供石油地质、储层地质和油气成藏动力学等研究方向的技术人员及大专院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩气成藏理论/杨华等著. —北京:科学出版社, 2016.6

ISBN 978-7-03-049176-3

I. ①鄂… II. ①杨… III. ①鄂尔多斯盆地—致密砂岩—砂岩油气藏—研究 IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第145959号

责任编辑:杨 岭 郑述方/责任校对:鲁 素

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年6月第 一 版 开本:889×1194 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:789 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

鄂尔多斯盆地是中国第二大含油气盆地，处于中国大陆中部，盆地为多期原型盆地叠合而形成，改造特征明显，含油主要层位为中生界，含气主要层位为古生界，残留分布面积约  $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，其中，上古生界为碎屑岩含气层系，下古生界为碳酸盐岩含气层系，盆地天然气资源丰富，最新资源评价结果(2010)表明，盆地古生界天然气地质资源量为  $15.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

鄂尔多斯盆地致密砂岩气勘探是我国最早进行致密砂岩天然气勘探的盆地之一。从1969年盆地西缘冲断带刘庆1井上古生界下石盒子组砂岩中获工业气流算起，上古生界碎屑岩含气层系天然气勘探历史不到45年。早期的天然气勘探是伴随着石油勘探进行的，以常规气为方向、以寻找构造气藏为出发点，在构造圈闭发育区进行勘探。1985年，以盆地东部子洲县麒麟沟隆起上的麒参1井获低产气流为标志，发现了致密砂岩气。该井于上古生界二叠系下石盒子组盒8段、山西组山2段，测试获得井口产量分别为  $0.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、 $0.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。1988年，以镇川堡气田提交控制储量  $32.5 \times 10^8 \text{ m}^3$  为标志，发现了首个致密砂岩气田。2000年，以榆林气田发现为标志，致密砂岩气勘探进入勘探突破和大规模勘探阶段。近15年来，发现和探明了苏里格、榆林、乌审旗、子洲、神木和米脂等大气田。到2012年年底，长庆油田探区累计探明、基本探明天然气储量达到  $4.06 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，致密砂岩气年产量已超过  $250 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。致密砂岩气储量、产量大幅度增长过程，也是致密砂岩气藏不断深入认识的过程。因此，勘探与开发实践是大面积致密砂岩气成藏地质理论形成的基本前提。

鄂尔多斯盆地也是我国最早进行致密砂岩气成藏理论研究的盆地之一。1979年Marster提出深盆气理论1年后，也就是1980年，他来到中国进行学术访问，介绍了有关深盆气的理论和认识。甘克文(1983)应用在这一理论进行了“鄂尔多斯盆地和阿尔伯塔盆地的类比分析”的研究，提出了“最可能形成大面积低渗透气的场所是冲断带东侧下降盘以石盒子组为主的上古生界”。随后，许多研究者开展了鄂尔多斯盆地上古生界深盆气研究，获得了一批研究成果。值得一提的是，针对鄂尔多斯盆地致密砂岩深盆气，中石油组织召开了两次全国性学术讨论会(1997年3月广州和2000年7月西安)，主要是探讨鄂尔多斯盆地深盆地气特征与勘探潜力。目前勘探证实，鄂尔多斯盆地致密砂岩气大规模储量不是分布在深盆的天环凹陷而是在伊陕斜坡，深盆中天然气勘探并没有取得成功，深盆气理论中典型的气、水倒置现象已证实并不存在，但证实了致密砂岩大面积含气这一深盆气概念中的重要特征和内涵。不可否认，深盆气理论在鄂尔多斯盆地的研究与应用，对坚定在盆地上古生界寻找致密砂岩气大气田信心、推动盆地致密砂岩气勘探起到了重要作用，也为大面积致密砂岩气成藏地质理论形成奠定了理论基础。

在国外，美国于1927年在圣胡安盆地就发现了致密砂岩气藏，并于20世纪50年代初投入开发。目前，美国在30个盆地中大约有900个气田生产致密砂岩气，可采储量  $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$  左右，生产井超过  $4 \times 10^4$  口，2010年产量达  $1754 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占美国当年天然气总产量( $6110 \times 10^8 \text{ m}^3$ )的30%。据美国地质调查局(USGS)研究，全球已发现或推测发育致密砂岩气的盆地有70个左右，资源量约为  $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ；在我国，近几年致密砂岩气已成为天然气增储上产的重要现实领域，致密砂岩地质储量年增  $3000 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上，产量年增  $50 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上，储量和产量呈快速增长态势。2011年年底，我国致密砂岩气累计探明地质储量为  $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，已占全国天然气总探明地质储量的40%；可采储量  $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，约占全国天然气可采储量的1/3。2011年致密砂岩气产量达  $256 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占全国天然气总产量的1/4。尽管国内外致密砂岩气勘探开发历史悠久，储、产量较大，在当今世界能源结构中占有一席之地，但是，由于致密砂岩储层的复杂性、成藏规律的特殊性以及各含气盆地地质条件的不同，再加上各国经济、技术条件的不同，对致密砂岩气藏的定义、地质内涵、成藏理论、成藏规律及成藏主控因素都有不同的理解和学术争论，

因此,将鄂尔多斯盆地大面积致密砂岩成藏理论和勘探成果介绍给国内外同行,对促进致密砂岩气成藏理论研究和勘探都具有深远的意义。

本书的作者长期从事鄂尔多斯盆地天然气成藏理论研究和勘探工作。自从参加国家“六五”科技攻关项目——“陕甘宁盆地上古生界煤成气藏分布规律及勘探方向”以来,经历了从天然气成藏理论研究到致密砂岩气勘探决策过程,见证了从常规天然气勘探向致密砂岩气勘探转变过程中的艰难与曲折,收获了致密砂岩气成藏理论认识和丰富的勘探成果。因此,本书是作者长期从事鄂尔多斯盆地致密砂岩气勘探理论研究和勘探实践的总结和提升。

本书依据大量的致密砂岩气勘探开发生产、实验和试验原始数据,在生烃模拟、水槽模拟、成岩模拟等实验结果等基础上,以大面积致密砂岩气成藏物质聚集与天然气运聚机理研究为核心,突出鄂尔多斯盆地特色,从基本概念、理论原理、技术方法上系统阐述致密砂岩天然气成藏地质特征,形成致密砂岩大面积天然气聚集成藏理论体系。主要内容包括:

(1)系统阐述致密砂岩气藏的地质定义的内涵;总结鄂尔多斯盆地上古生界大面积致密砂岩气藏勘探历史、技术和经验教训。

(2)从盆地深部地壳结构研究入手,探索盆地构造稳定性成因及致密砂岩气藏形成的有利构造背景,研究原型盆地演化过程与大面积致密砂岩气的成藏关系。

(3)从煤系烃源岩分布稳定性、热事件及大面积分布高成熟烃源岩的生烃演化特征出发,建立广覆式生烃模式,研究其特殊性和对大面积致密砂岩气藏形成的重要性。

(4)从大华北原型盆地角度出发,研究在盆、山耦合演化过程中晚古生代鄂尔多斯盆地区沉积体系分布。通过以苏里格地区盒8段沉积为原型的水槽模拟实验,阐述浅水沉积盆地中砂体沉积分布特征及叠加样式,总结鄂尔多斯盆地大面积粗砂富集机理,建立沉积模式。

(5)在成岩模拟实验基础上,揭示上古生界整体沉降埋藏过程中流体压实效应、近距离成岩流体滞流效应、热压实效应及埋藏时间效应的砂岩储层致密化机理。

(6)研究上古生界广覆式生烃背景下的煤系烃源岩有机质生烃作用、构造热事件作用产生异常高压流体的排聚机理,建立致密砂岩中超压-微裂缝-气体膨胀的近距离充注成藏模式。

(7)在致密砂岩地层压力原始数据筛选依据和压力系统划分标准基础上,分析鄂尔多斯盆地致密砂岩三种不同地层压力系统成因机理及形成演化过程。

(8)从致密砂岩地层水原始数据筛选和地层水化学性质真实性出发,系统阐述致密砂岩地层水成因、产出状况。根据大量生产测试资料,分析上古生界致密砂岩气、水分布控制因素,总结不同尺度致密砂岩气、水分布模式,提出致密砂岩产水具有普遍特征。

(9)总结平缓稳定构造背景下大面积致密砂岩气藏形成的有利地质条件,分析大面积致密砂岩含气的基本特征,阐述定量评价天然气充注强度的基本原理,分析研究上古生界气藏大面积富集机理,形成上古生界致密砂岩的天然气充注程度评价方法和评价标准。

(10)以资源三角理论为基础,应用鄂尔多斯盆地天然气资源评价研究结果,分析常规天然气、煤层气、页岩气、生物气和致密砂岩气等天然气资源结构特点,阐述鄂尔多斯盆地天然气勘探战略接替资源。

(11)介绍鄂尔多斯盆地上古生界典型致密砂岩气田地质特征、勘探发现历程与经验,总结分析鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏的基本类型及分布规律。

最后,作者要感谢长期与我们合作的中国科学院广州分院、中国科学院兰州分院、中国石油勘探开发研究院、中国石油大学(北京、华东)、同济大学、西北大学、中国矿业大学、西安石油大学、西南石油大学、成都理工大学等有关教授和专家所做的工作。

# 目 录

## 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 绪论                   | 1  |
| 1.1 致密砂岩气相关概念            | 1  |
| 1.1.1 致密砂岩气定义沿革          | 1  |
| 1.1.2 致密砂岩气地质特征          | 2  |
| 1.1.3 致密砂岩气地质特点          | 3  |
| 1.2 致密砂岩气成藏理论与技术         | 4  |
| 1.2.1 致密砂岩气成藏理论研究        | 4  |
| 1.2.2 致密砂岩气勘探开发技术发展趋势    | 6  |
| 1.3 鄂尔多斯盆地致密砂岩气勘探阶段划分与成果 | 8  |
| 参考文献                     | 12 |
| 第2章 盆地区域地质               | 15 |
| 2.1 盆地现今构造特征             | 15 |
| 2.2 盆地深部构造背景             | 15 |
| 2.2.1 岩石圈特征              | 15 |
| 2.2.2 莫霍面构造特征            | 17 |
| 2.3 盆地结晶基底特征             | 19 |
| 2.3.1 结晶基底地球物理特征         | 19 |
| 2.3.2 结晶基底构造特征           | 22 |
| 2.3.3 结晶基底岩相分带及定年        | 25 |
| 2.3.4 结晶基底形成与演化          | 27 |
| 2.4 地层系统                 | 29 |
| 2.4.1 太古界                | 30 |
| 2.4.2 元古界                | 30 |
| 2.4.3 下古生界               | 31 |
| 2.4.4 上古生界               | 31 |
| 2.4.5 中生界                | 31 |
| 2.4.6 新生界                | 32 |
| 2.5 原型盆地多期叠合与形成阶段        | 32 |
| 2.5.1 中晚元古代拗拉谷原型盆地发育期    | 32 |
| 2.5.2 古生代—侏罗纪克拉通原型盆地发育期  | 33 |
| 2.5.3 白垩纪类前陆原型盆地发育期      | 40 |
| 2.5.4 新生代周缘断陷原型盆地发育期     | 41 |
| 参考文献                     | 42 |
| 第3章 上古生界煤系烃源岩广覆式生烃       | 45 |
| 3.1 烃源岩类型及空间分布           | 45 |
| 3.1.1 烃源岩类型              | 45 |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 3.1.2 烃源岩空间分布 .....                  | 47         |
| 3.1.3 煤岩烃源岩稳定分布的基本条件 .....           | 50         |
| 3.2 烃源岩有机地球化学特征 .....                | 52         |
| 3.2.1 有机质丰度 .....                    | 52         |
| 3.2.2 有机质类型 .....                    | 53         |
| 3.2.3 有机质热演化程度 .....                 | 54         |
| 3.3 煤岩生烃热压模拟实验 .....                 | 55         |
| 3.3.1 实验煤岩样品 .....                   | 55         |
| 3.3.2 实验方法及流程 .....                  | 56         |
| 3.3.3 实验结果分析 .....                   | 57         |
| 3.3.4 煤岩生烃演化模式 .....                 | 60         |
| 3.4 烃源岩生烃演化史 .....                   | 61         |
| 3.4.1 晚中生代异常古地温场 .....               | 62         |
| 3.4.2 烃源岩生烃演化阶段 .....                | 64         |
| 3.4.3 煤系烃源岩高成熟广覆式生烃模式 .....          | 65         |
| 参考文献 .....                           | 69         |
| <b>第4章 盆地北部上古生界大面积富砂机理 .....</b>     | <b>72</b>  |
| 4.1 大面积富砂地质内涵与特征 .....               | 72         |
| 4.1.1 大面积富砂地质内涵 .....                | 72         |
| 4.1.2 盆地北部上古生界大面积富砂基本特征 .....        | 74         |
| 4.2 晚古生代沉积物源分析 .....                 | 77         |
| 4.2.1 物源综合分析方法综述 .....               | 77         |
| 4.2.2 晚古生代鄂尔多斯沉积区多物源供给 .....         | 79         |
| 4.3 上古生界沉积体系与砂体分布 .....              | 84         |
| 4.3.1 沉积体系特征与分布 .....                | 84         |
| 4.3.2 晚古生代沉积演化与砂体分布 .....            | 91         |
| 4.4 晚古生代盆地北部砂体叠加样式水槽模拟 .....         | 105        |
| 4.4.1 实验参数确定方法 .....                 | 106        |
| 4.4.2 实验过程 .....                     | 107        |
| 4.4.3 实验结果 .....                     | 108        |
| 4.4.4 实验分析 .....                     | 110        |
| 4.5 晚古生代盆地北部大面积富砂有利条件 .....          | 112        |
| 4.5.1 大型克拉通盆地缓斜坡古构造背景 .....          | 112        |
| 4.5.2 盆山耦合演化与充足的物源供给 .....           | 112        |
| 4.5.3 缓坡浅水三角洲与大面积砂体发育 .....          | 125        |
| 4.5.4 强水动力条件与多河道砂体叠加 .....           | 126        |
| 参考文献 .....                           | 128        |
| <b>第5章 盆地上古生界致密砂岩储层表征与质量评价 .....</b> | <b>130</b> |
| 5.1 致密砂岩储层表征技术 .....                 | 130        |
| 5.1.1 图像表征技术 .....                   | 130        |
| 5.1.2 压汞表征技术 .....                   | 131        |
| 5.1.3 核磁共振表征技术 .....                 | 132        |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 5.1.4 三维数字岩心表征技术          | 132 |
| 5.2 上古生界致密砂岩储层特征          | 133 |
| 5.2.1 储层岩石学特征             | 133 |
| 5.2.2 储层物性特征              | 133 |
| 5.2.3 储层孔隙类型及孔隙结构         | 134 |
| 5.2.4 致密砂岩储层的特殊性          | 139 |
| 5.3 上古生界致密砂岩成岩体系与成岩相      | 140 |
| 5.3.1 成岩作用特征              | 140 |
| 5.3.2 成岩流体与成岩演化序列         | 145 |
| 5.3.3 成岩相划分               | 148 |
| 5.4 成岩模拟实验与上古生界致密砂岩次生孔隙形成 | 150 |
| 5.4.1 成岩模拟实验              | 150 |
| 5.4.2 次生孔隙形成              | 157 |
| 5.5 储层致密化机理               | 159 |
| 5.5.1 流体压实效应              | 160 |
| 5.5.2 近距离成岩流体滞流效应         | 160 |
| 5.5.3 热压实效应               | 161 |
| 5.5.4 埋藏时间效应              | 161 |
| 5.5.5 致密砂岩孔隙演化历史          | 162 |
| 5.6 上古生界致密砂岩储层质量评价        | 165 |
| 5.6.1 储层评价参数              | 165 |
| 5.6.2 储层质量评价标准            | 167 |
| 参考文献                      | 168 |
| 第6章 上古生界天然气近距离运聚成藏        | 171 |
| 6.1 上古生界天然气地化特征与气源对比      | 171 |
| 6.1.1 天然气地化特征             | 171 |
| 6.1.2 天然气成因               | 176 |
| 6.1.3 气源对比                | 178 |
| 6.2 上古生界天然气运聚成藏年代分析       | 180 |
| 6.2.1 地质综合方法              | 180 |
| 6.2.2 流体包裹体方法             | 182 |
| 6.2.3 储层自生伊利石年代学分析法       | 188 |
| 6.3 上古生界天然气近距离运聚模式        | 191 |
| 6.3.1 天然气运聚特征概述           | 191 |
| 6.3.2 上古生界天然气近距离运聚证据      | 201 |
| 6.3.3 上古生界天然气垂向运聚通道       | 205 |
| 6.3.4 上古生界流体膨胀—微裂缝近距离运聚模式 | 207 |
| 参考文献                      | 211 |
| 第7章 上古生界地层压力系统形成与演化       | 215 |
| 7.1 压力系统划分及分布特征           | 215 |
| 7.1.1 地下压力分类              | 215 |
| 7.1.2 致密砂岩地层压力数据分析        | 216 |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 7.1.3 压力系统划分原则                | 218        |
| 7.1.4 压力系统分布特征                | 221        |
| 7.2 古压力恢复与分布                  | 224        |
| 7.2.1 流体包裹体法恢复古压力             | 224        |
| 7.2.2 平衡深度法恢复古压力              | 229        |
| 7.2.3 古压力分布特征                 | 231        |
| 7.3 异常压力形成机理                  | 232        |
| 7.3.1 异常低压                    | 232        |
| 7.3.2 异常高压                    | 236        |
| 7.4 压力系统的演化特征                 | 238        |
| 7.4.1 压力系统演化阶段                | 239        |
| 7.4.2 压力系统演化类型                | 240        |
| 参考文献                          | 242        |
| <b>第8章 致密砂岩气水分布</b>           | <b>245</b> |
| 8.1 致密砂岩含气特征                  | 245        |
| 8.1.1 游离气、吸附气共存               | 245        |
| 8.1.2 含气饱和度变化大                | 247        |
| 8.1.3 含气高度大                   | 248        |
| 8.1.4 含气面积大                   | 249        |
| 8.1.5 气水分布复杂                  | 250        |
| 8.2 致密砂岩含气性识别方法               | 254        |
| 8.2.1 岩心录井识别法                 | 254        |
| 8.2.2 气测综合判识法                 | 254        |
| 8.2.3 测井识别法                   | 255        |
| 8.3 致密砂岩含水特征                  | 256        |
| 8.3.1 地层水地球化学特征               | 256        |
| 8.3.2 致密砂岩地层水赋存状态             | 260        |
| 8.3.3 地层产水的成因类型               | 264        |
| 8.4 气水分布模式                    | 266        |
| 8.4.1 盆地尺度气水分布模式              | 266        |
| 8.4.2 气藏尺度气水分布模式              | 270        |
| 8.4.3 微观尺度气水分布模式              | 273        |
| 参考文献                          | 277        |
| <b>第9章 盆地上古生界大面积致密砂岩气成藏机理</b> | <b>279</b> |
| 9.1 晚古生代大型克拉通盆地的成藏物质聚集与分布     | 279        |
| 9.1.1 克拉通盆地背景下的稳定沉积           | 279        |
| 9.1.2 克拉通盆地烃源岩的广覆式分布          | 280        |
| 9.1.3 克拉通盆地大型缓坡浅水三角洲储集砂体大面积分布 | 282        |
| 9.1.4 克拉通盆地背景下烃源岩的大范围生气       | 283        |
| 9.1.5 克拉通盆地岩性生储盖组合的稳定分布       | 284        |
| 9.2 晚中生代类前陆盆地背景下天然气中—高强度充注    | 285        |
| 9.2.1 天然气充注定量评价原理             | 285        |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 9.2.2 天然气充注指数评价标准·····                | 286 |
| 9.2.3 天然气充注程度综合评价·····                | 287 |
| 9.3 新生代成藏期后良好的保存及气源补给·····            | 288 |
| 9.3.1 盆地主体构造稳定·····                   | 289 |
| 9.3.2 泥岩封盖层区域性分布·····                 | 289 |
| 9.3.3 低倾角地层的封堵条件优越·····               | 291 |
| 9.3.4 天然气散失与补给的动平衡·····               | 292 |
| 参考文献·····                             | 299 |
| <b>第 10 章 盆地天然气资源金字塔结构</b> ·····      | 302 |
| 10.1 油气资源金字塔结构与意义·····                | 302 |
| 10.1.1 资源三角结构·····                    | 302 |
| 10.1.2 天然气资源金字塔结构·····                | 304 |
| 10.1.3 资源金字塔结构意义·····                 | 305 |
| 10.2 鄂尔多斯盆地天然气资源结构·····               | 306 |
| 10.2.1 常规天然气资源·····                   | 306 |
| 10.2.2 非常规天然气资源·····                  | 307 |
| 10.2.3 天然气资源三角结构·····                 | 310 |
| 10.3 鄂尔多斯盆地致密砂岩气勘探潜力·····             | 311 |
| 10.3.1 致密砂岩气勘探前景·····                 | 311 |
| 10.3.2 致密砂岩气勘探有利区·····                | 312 |
| 参考文献·····                             | 313 |
| <b>第 11 章 鄂尔多斯盆地致密砂岩大气田勘探实例</b> ····· | 315 |
| 11.1 苏里格致密砂岩大气田·····                  | 315 |
| 11.1.1 勘探历程·····                      | 315 |
| 11.1.2 气田基本特征·····                    | 319 |
| 11.1.3 成藏特征·····                      | 330 |
| 11.1.4 成藏模式·····                      | 332 |
| 11.2 神木海相三角洲致密砂岩大气田·····              | 332 |
| 11.2.1 气田勘探开发历程·····                  | 333 |
| 11.2.2 气田基本特征·····                    | 334 |
| 11.2.3 成藏特征·····                      | 348 |
| 11.3 榆林海退型三角洲致密砂岩大气田·····             | 351 |
| 11.3.1 勘探开发历程·····                    | 351 |
| 11.3.2 气田基本特征·····                    | 353 |
| 11.3.3 成藏地质作用·····                    | 365 |
| 参考文献·····                             | 374 |
| 后记·····                               | 376 |

# 第1章 绪 论

致密砂岩气是一种储集于低渗透-特低渗透致密砂岩储层中的非常规天然气资源，依靠常规技术难以开采，需通过大规模压裂或特殊采气工艺技术才能产出具有经济价值的天然气。致密砂岩气在储层孔隙结构、成藏机理、分布规律等方面具有显著的特殊性。致密砂岩气在我国天然气生产中所占比例越来越大，2010 年就达到了天然气总产量的 1/4。鄂尔多斯盆地上古生界致密砂岩气分布广泛，在理论创新与技术进步推动下，致密砂岩气的勘探开发取得了重大成就。

## 1.1 致密砂岩气相关概念

致密砂岩气的最初定义主要是为了从商业角度对所谓的“高成本”“低成本”气藏进行一个界定，以便对“高成本”天然气提供价格上的补贴。由于不同国家或不同学者在对致密砂岩气进行界定时，主要依据是当时的油气资源状况和技术经济条件，这些因素的变化不可避免地导致人们对致密砂岩气的认识发生变化。目前，国内外致密砂岩气勘探开发已经取得重要成果，但是关于致密砂岩气的定义还存在分歧，缺乏致密砂岩气的统一划分标准。

### 1.1.1 致密砂岩气定义沿革

致密砂岩气最早的定义可以追溯到 1978 年美国天然气政策法案，为给所谓的“高成本”天然气开发提供价格上的补贴，美国天然气政策法案把致密砂岩气开发的补贴标准规定为：①整个产层的平均原地气渗透率为  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  或更小；②未压裂的稳定产气率符合特定指标；③单井日产油当量不大于 5 桶；④含气砂岩的有效厚度至少为 100ft(30.5m)，含水饱和度必须低于 65%，孔隙度为 5%~15%；⑤产层段地层总厚度中至少有 15%的有效厚度等。总体而言，美国政府关于致密砂岩气的划分考虑因素较多，但渗透率是其中的关键参数。致密气层(包括砂岩、碳酸盐岩等)的渗透率较低，其天然气的产能低，只有投入压裂、水平井、多分支井等措施才能获得经济效益。因此，根据储层渗透率这一关键参数，德国石油与煤炭科学技术协会(DGMK)将储层渗透率小于  $0.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的气层划分为致密气，而英国把储层渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的气层称为致密气。

Spencer(1985, 1989)等许多研究者都将  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  作为致密砂岩储层的渗透率上限，并将天然气储层分为 3 类：原地渗透率一般在  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  以下的为致密储层、原地渗透率在  $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的为近致密储层、原地渗透率大于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的为常规储层。Kazemi(1982)等则将气体渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的含气储层称为低渗透或致密气储层，而将气体渗透率大于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的天然气称为常规气(表 1-1)。

表 1-1 国外不同机构、不同学者致密砂岩分类的孔隙度、渗透率标准

| 孔隙度/%     | 渗透率/( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) | 数据来源               | 备注    |
|-----------|----------------------------------------|--------------------|-------|
| 5~15      | $\leq 0.1$                             | FERC, 1978         | 原地渗透率 |
|           | $\leq 0.1$                             | Elkins L E, 1978   | 原地渗透率 |
|           | $\leq 1$                               | Kazemi H, 1982     | 空气渗透率 |
| $\leq 10$ | $\leq 0.1$                             | Wyman R E, 1985    | 原地渗透率 |
|           | $\leq 0.1$                             | Spencer C W, 1985  | 原地渗透率 |
| $\leq 12$ | $\leq 1$                               | Surdam R C, 1997   | 空气渗透率 |
|           | $\leq 0.1$                             | Holditch S A, 2006 | 原地渗透率 |

在我国，致密砂岩储层的概念自 20 世纪 80 年代开始出现。袁政文等(1990)将地面渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ 、孔隙度小于 12% 的储层界定为致密储层。20 世纪 90 年代后期，国家先后三次制定了致密砂岩气的相关行业标准，并引起较多关注和研究(表 1-2)。1998 年，中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》将低渗透含气砂岩储层分为低渗透与特低渗透储层两大类。前者孔隙度为 10%~15%、渗透率为  $(0.1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ ，后者孔隙度小于 10%、渗透率小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ 。2009 年，中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》将低渗透含气砂岩储层定义为储层孔隙度小于 5%，渗透率小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$  的储层。在中华人民共和国石油天然气行业标准(2011)的致密砂岩气定义中，突出了覆压基质渗透率小于等于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ 。

表 1-2 国内不同机构、不同学者致密砂岩分类的孔隙度、渗透率标准

| 孔隙度/%     | 渗透率/ $(\times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2})$ | 数据来源           | 备注      |
|-----------|------------------------------------------|----------------|---------|
| $\leq 10$ | $\leq 0.1$                               | SY/T 6185—1998 | 有效渗透率   |
| $\leq 5$  | $\leq 0.1$                               | SY/T 6168—2009 | 有效渗透率   |
|           | $\leq 0.1$                               | SY/T 6832—2011 | 覆压基质渗透率 |
| $\leq 12$ | $\leq 1$                                 | 袁政文, 1990      | 空气渗透率   |
| $\leq 12$ | $\leq 0.1$                               | 关德师, 1995      | 有效渗透率   |
| $\leq 10$ | $\leq 0.5$                               | 戴金星, 1996      | 有效渗透率   |
| 7~12      | $\leq 1$                                 | 杨晓宁, 2005      | 空气渗透率   |
| 3~12      | $\leq 0.1$                               | 邹才能, 2009      | 有效渗透率   |

综上所述，国内外不同机构和研究者对致密砂岩的划分标准并未统一，尤其是不同实验条件下测定的渗透率，如空气渗透率、原地渗透率、有效渗透率以及覆压基质渗透率，彼此之间具有较大差异。致密砂岩具有呈带连片的大面积分布特征，同一层段的致密砂岩在不同深度条件的覆压基质渗透率也存在差异。此外，由于沉积、成岩作用的影响，致密砂岩物性在垂向与横向上的非均质性强烈，其渗透率往往呈数量级的变化。因此，仅依据渗透率对致密砂岩进行界定是不恰当的，应考虑更多其他的因素。

邹才能等(2009)根据国内外研究成果，提出致密砂岩不仅是指孔隙度小于 10%、原地渗透率小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$  或绝对渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ ，而且储层孔喉半径小于  $1 \mu\text{m}$ 、含气饱和度小于 60%。这种气藏一般无自然工业产量，但在一定经济条件和技术措施下可以获得工业天然气产量。

赵靖舟(2012)将致密砂岩气定义为储层致密、只有经过大型压裂改造等措施才可以获得经济产量的烃源岩外气藏，其绝对渗透率一般小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^{-2}$ 。这一定义既考虑了致密砂岩气的商业价值，也赋予了其一定的地质内涵。

1.1.2 致密砂岩气地质特征

从商业角度看，致密砂岩气的开发主要受天然气价格、技术经济条件等的变化而影响。因此，仅从商业角度难以反映致密砂岩气的本质特征。从地质角度来讲，无论世界石油资源状况、技术经济条件等如何变化，致密砂岩气所具有的独特性是不会变的。系统总结致密砂岩气独特的地质特征，明确其地质内涵，进而从地质角度对致密砂岩气进行定义，对致密砂岩气成藏与分布规律的研究具有重要意义。

1. 致密砂岩气成藏地质特征

根据目前国内外有关致密砂岩气的研究成果，致密砂岩与常规储层相比，表现为相对较低的孔渗性能，孔喉直径小(但是明显大于页岩气与煤层气储层的孔喉直径)。致密砂岩气在盆地内可以广泛分布，它不像常规气藏一样受控于构造的高低，在盆地的低部位或是斜坡部位均有分布。致密砂岩由于其较小的孔喉特性，因此，浮力难以满足致密砂岩气成藏的动力需要，而更多地依靠非浮力驱动。在致密砂岩

中,天然气聚集动力主要来自于如烃源岩充注的流体膨胀压力、欠压实和构造应力及地热增温的膨胀作用等。天然气聚集动力与毛细管阻力二者耦合控制含气边界,进而导致了致密砂岩气往往无明显的气水界面和圈闭界线,天然气的渗流特征也以非达西渗流为主(表 1-3)。

表 1-3 常规天然气、致密砂岩气、煤层气、页岩气基本地质特征对比表

| 要素特征   | 常规气                                 | 致密砂岩气                               | 页岩气                                 | 煤层气                               |
|--------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 孔隙度    | >10%或 12%                           | <10%或<12%                           | <6%                                 | <10%                              |
| 地层渗透率  | $>0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | $<0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ | $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ |
| 孔喉直径   | $>2 \mu\text{m}$                    | $0.03 \sim 2 \mu\text{m}$           | $0.005 \sim 0.05 \mu\text{m}$       | $0.005 \sim 0.05 \mu\text{m}$     |
| 分布形式   | 构造高部位                               | 盆地深部或斜坡部位                           | 靠近盆地沉降-沉积中心                         | 陆相高等植物发育区                         |
| 聚集动力   | 浮力                                  | 非浮力                                 | 非浮力                                 | 非浮力                               |
| 气水分布   | 上气下水,界面明显                           | 界面模糊                                | 界面模糊                                | 界面模糊                              |
| 渗流特征   | 达西渗流                                | 非达西渗流                               | 非达西渗流                               | 非达西渗流                             |
| 气体赋存形式 | 游离气                                 | 游离气为主,吸附气为辅                         | 游离气吸附气并存                            | 吸附气为主                             |
| 圈闭界线   | 明显                                  | 模糊                                  | /                                   | /                                 |
| 源储关系   | 下生上储、上生下储                           | 下生上储、上生下储、自生自储                      | 源岩储集                                | 源岩储集                              |
| 运移特征   | 二次运移                                | 近距离运移为主                             | 源内运移                                | 源内运移                              |

## 2. 致密砂岩储层孔喉分布特征

Nelson(2009)等研究表明,引起致密砂岩气和常规气所有地质差异的最重要原因在于其储层孔喉的大小,并且指出常规砂岩储层孔喉尺寸通常大于  $2 \mu\text{m}$ ,致密砂岩孔喉尺寸介于  $0.03 \sim 2 \mu\text{m}$ 。由常规气藏到非常规气藏,储层孔喉逐渐变小,特别是  $1 \mu\text{m}$  的孔喉尺寸似乎标志着低品质常规储集砂岩向致密砂岩的过渡。在这一孔喉尺寸之下,由于较多纳米级孔喉的存在,而纳米级孔喉系统对水柱压力与天然气浮力作用起到了明显的限制。致密砂岩气浮力驱动在油气聚集中的作用将变得次要,使气藏中流体之间分异变差、气水界面变得模糊。

在材料学的定义中,微米级指的是大于  $1 \mu\text{m}$  的尺度范围,亚微米级尺度是指  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  范围,纳米级尺度是指  $1 \sim 100 \text{nm}$  范围。纳米材料是在三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围或由它们作为基本单元构成的材料,这大约相当于  $10 \sim 100$  个原子紧密排列在一起的尺度,其中有 50%或以上的粒子直径为  $1 \sim 100 \text{nm}$ 。纳米级孔喉和纳米级油气储层是近几年提出的概念,由于其理论的先进性和分析方法的独特性受到了广泛关注(王君等, 2001; Nelson, 2009; 邹才能, 2012)。实际上,任何油气储层都或多或少存在纳米级孔喉,只有纳米级孔喉在储层孔喉体系中占据一定量值以后才能称其为纳米级孔喉储层,但这一量值的具体大小在学术界和产业界尚未定论。在本书中,作者借用纳米-亚微米材料定义,将纳米-亚微米级储层定义为储层中纳米-亚微米级孔喉达到 50%以上,且孔喉直径在  $1 \mu\text{m}$  以下者为纳米-亚微米级孔喉储层。

### 1.1.3 致密砂岩气地质特点

自美国在 1973 年制定致密砂岩气的补贴标准以来,在工程上关于致密砂岩气的定义长期存在分歧,但是从地质方面讲,致密砂岩气与常规砂岩气的本质区别在于储层喉道大小分布的差异,致密砂岩发育大量微米级和纳米-亚微米级孔喉。这就意味着致密砂岩气具有非常规特色,表现为天然气浮力驱动微弱,天然气聚集呈准连续、连续分布。

#### 1. 非浮力驱动

常规油气藏储集体发育毫米级或微米级孔喉介质,毛细管阻力较小,油气运移符合达西渗流规律。

页岩气、煤层气等非常规油气储集体广泛发育纳米级孔喉系统,毛细管阻力大,油气运移距离小,基本为原位滞留油气,且主要以吸附气的形式存在,决定了油气基本呈连续型分布。致密砂岩气的孔喉大小介于常规油气藏和页岩气、煤层气藏之间,毛细管阻力较大,油气运移的浮力作用微弱,表现为近源储集,赋存形式以游离气为主,吸附气为辅。

常规气藏是浮力驱动形成的气藏,其分布表现为受构造圈闭或岩性圈闭控制的不连续分布形式,天然气的赋存形式为游离气;而致密砂岩气则是非浮力驱动形成的气藏,其分布更多地表现为不受构造圈闭或岩性圈闭控制的区域性连续分布形式(Law, 2000)。这种特征决定了致密砂岩气主要呈连续分布。鄂尔多斯盆地上古生界地层平缓,致密砂岩气近南北向大面积连续分布。

## 2. 游离气为主,吸附气为辅

鄂尔多斯盆地致密砂岩储层中,存在大量亚微米-纳米级孔喉(接近 80%)。大量微米-纳米级孔喉的存在,导致了储层毛细管阻力的增大,油气更易滞留,必然导致储层中吸附气含量的增多,因此,致密砂岩中除了含有较多的游离气外,吸附气也是其重要的气体赋存形式之一。

## 3. 源外聚集

页岩气藏、煤层气藏与致密砂岩气具有类似的油气聚集驱动力和连续分布形式,但是最大的区别在于致密砂岩气主要表现为天然气可以在源外聚集的特征,而页岩气藏、煤层气藏则表现为自生自储的源内聚集特征。

由此可见,致密砂岩气的地质定义既要体现出其与常规气藏的本质区别,又要区别于页岩气藏、煤层气藏等。综合以上分析,致密砂岩气的地质定义可表述为在非浮力驱动下,以游离气为主,吸附气为辅和区域性大面积分布形式聚集在致密砂岩储层中的气藏。这里的致密砂岩储层是指孔喉小于  $2\mu\text{m}$  的砂岩。在地质定义时,更强调储层喉道的大小,而不是渗透率的大小,其原因是孔喉尺寸和毛管压力的变化趋势刚好相反,孔喉尺寸标尺要比渗透率标尺更适合天然气充注的描述。

通过不同类型气藏主要地质特征的系统对比可见,常规气藏、致密砂岩气、页岩气藏和煤层气藏具有核心地质条件具有系列变化特征。综上所述,致密砂岩气最本质的成藏地质特征表现为非浮力驱动的聚集天然气。因此,致密砂岩气表现为源外非浮力驱动聚集,气藏分布范围一般不受构造圈闭的控制。

# 1.2 致密砂岩气成藏理论与技术

在世界油气发展历史进程中,每一次重大突破无不伴随着理论和勘探开发技术的创新。在致密砂岩气的勘探开发历史中,由于其自身所具有的独特性,相关的成藏地质理论、储层描述或储层综合评价预测技术以及开发技术的发展在其中显得尤为重要。

## 1.2.1 致密砂岩气成藏理论研究

### 1. 致密砂岩天然气成藏理论发展历史

致密砂岩气的勘探和研究已有近 90 年的历史。早在 1927 年,美国的圣胡安盆地就发现了致密砂岩气,并于 20 世纪 50 年代初最早投入开发,当时人们称之为“隐蔽圈闭”(subtle trap)气藏(Levoesen, 1964)。Savit(1982)认为隐蔽圈闭是指用当前普遍采用的勘探方法难以圈定其位置的圈闭。庞雄奇等(2007)将隐蔽油气藏定义为:在现有理论和技术条件下,从物探和测井等资料上不能直接发现或识别出来的气藏概称为隐蔽油气藏。“隐蔽圈闭”主要用来描述构造、地层、流体(水动力)等多要素结合形成的复合圈闭,缺乏严格的含义,未能被广泛使用(杨克明等, 2013)。随着勘探技术的发展,隐蔽油气藏/圈闭的具体分布范围将不断变化,因此其内涵具有不确定性和不一致性,它不是一个严格的圈闭分类术语,在油气圈闭(油气藏)分类体系中没有独立的位置。

隐蔽油气藏的最初概念虽然是在致密砂岩气发现之后提出的,但前者是以寻找的难易程度为标准提出来的,它与圈闭的成因类型无关,不指特定的圈闭类型,而后者往往与勘探难易程度无关,但是开发难度较大。隐蔽油气藏更多的是一个勘探概念,定义中并未涉及任何显著的致密砂岩气的特征。因此,真正的致密砂岩气理论研究应是在“深盆地气藏”这一概念出现之后。

“深盆地气藏”(deep basin gas)则是 Masters(1979)在研究了加拿大艾伯塔盆地深盆地(前陆盆地深拗陷区)致密地层中天然气聚集特征以后首次提出来的。深盆地气藏特征可概括为:拗陷深部及斜坡的致密地层中普遍含气,气水倒置且无明显的气水界面,地层压力异常,活塞式运聚的动态圈闭气藏。深盆气的主要成藏条件为大面积分布的气源岩与大面积分布的致密储层密切接触,天然气持续补给,顶、底板封盖好,区域构造稳定且断裂少。深盆地概念虽然涉及了致密砂岩气,但是更强调埋藏深度较大的区域性天然气聚集,并未针对致密砂岩气本身的成藏特征。由此可见,深盆地既不是一个基于成因的术语,也不是一个基于机理的术语,而是一个在特定历史时期内延续使用的描述性术语,它不能与深层气、深源气等类型相区别,在英文表述上均为“deep basin gas”。

Rose(1984)等在研究 Raton 盆地天然气成藏特征时,首先使用了“盆地中心气”(basin-centered gas)这一术语。盆地中心气藏往往呈区域性分布,具有烃源的区域性及普遍成藏、储层处于气饱和状态和异常压力、缺失下倾的气水接触面及渗透率低等特点,与常规圈闭气藏具明显区别。随着越来越多与常规气藏具明显区别的其他类型油气藏的发现, Law 等(2002)提出非常规油气系统的概念,从而区别于常规的油气系统,并指出非常规油气系统与构造圈闭无关,基本不受重力分异的影响,区域上存在大规模的普遍含油气区带。

1995 年美国地质调查局提出了“连续油气聚集”的概念,突出强调连续气藏是受水柱影响不强烈的大型气藏,天然气富集与水对气体的浮力无直接关系,并且不是由下倾方向气水界面圈定的离散的、可数的气田群组成。邹才能等(2009)认为“连续型”油气藏是指低孔渗储集体系中油气运聚条件相似、含流体饱和度不均的非圈闭油气藏,即无明确的圈闭界限和盖层、主要分布在盆地斜坡或向斜部位、储集层低孔渗或特低孔渗、油气运聚中浮力作用受限、大面积非均匀性分布、源内或近源为主、无运移或一次运移为主、异常压力(高压或低压)、油气水分布复杂、常规技术较难开采的油气聚集。2006 年,美国地质调查局进一步提出深盆地(deep-basins gas)、页岩气(shale gas)、致密砂岩气(tight gas sands)、煤层气(coal bed methane)、浅层砂岩生物气(shallow microbial gas sands)和天然气水合物(natural gas hydrate, methane clathrate)等 6 种非常规圈闭天然气(unconventional gas),统称为连续气(continuous gas)。

“连续型”油气聚集虽然包括了大部分“非常规”油气,但是两者内涵有所不同。邹才能等(2012)认为“非常规”油气是针对油气资源的经济技术条件,而“连续型”油气聚集概念侧重的是反映油气形成、聚集机理和分布特征,具有科学性和规范性。

赵靖舟(2012)通过对比不同类型非常规油气资源的成藏特征,提出了准连续油气聚集的概念。认为准连续型油气聚集是指油气聚集受非常规圈闭控制、油气大面积准连续分布、无明确油/气藏边界的致密油气聚集。事实上,致密砂岩既非典型的连续型非常规油气聚集(如煤层气、页岩气),又非典型的不连续型常规油气聚集,而是介于连续的非常规油气藏与不连续的常规油气藏之间的一种过渡类型,即所谓的准连续型油气聚集。鄂尔多斯盆地上古生界密砂岩天然气成藏理论核心表现为“广覆式持续生烃充注、近距离运聚、大面积砂体叠置分布、大面积含气”。

综上所述,致密砂岩天然气成藏地质理论的发展与深盆地理论具有密切联系,在成藏动力以及聚集机理等方面对“连续型”油气聚集理论进一步完善。

## 2. 致密砂岩气成藏地质研究发展趋势

由于常规气藏和致密砂岩气在气藏的地质特征、油气聚集特征以及油气分布特征等方面的本质差异,常规油气藏地质研究与评价方法并不完全能满足致密砂岩气的勘探开发要求。因此,目前,针对致密砂岩气的成藏地质特征,在生烃、储层、油气聚集等方面均得到了较大的发展。

### 1) 生烃评价研究从生烃高峰期, 向生烃全过程扩展

常规气藏的生烃评价研究中, 更强调的是烃源岩生烃高峰期的研究。传统有机地球化学研究表明, 烃源岩镜质体反射率  $R_o$  处于 0.7%~1.3% 时, 为液态烃生烃高峰期;  $R_o$  处于 1.3%~2.0% 时, 是干酪根生气的主要时期。越来越多的研究表明,  $R_o$  处于 1.55%~3.5% 时, 有机质仍能大量生烃, 能够形成一定规模气藏 (Jarvie, 2007)。此外, 不同类型烃源岩在生烃高峰期烃源岩排烃效率差异也较大。有学者认为海相及湖相优质烃源岩, 在开放条件下, 高峰期排烃效率可高达 85%。煤系烃源岩和煤层排烃条件相对封闭, 烃源岩不同显微组分排烃的热演化范围相对较大, 从低成熟到高成熟后期均可进行大量排烃。一般烃源岩排烃效率在 40%~60%, 相应滞留烃含量也存在较大差异, 变化范围可在 15%~60% (赵文智, 等, 2011)。

总之, 中外学者对烃源岩生烃的研究已经从过去的关注液态烃生烃高峰期和主生气期逐渐向更高的热演化程度扩展。烃源岩在  $R_o > 2.0\%$  以后滞留烃含量多少以及能否形成规模气藏, 尚需开展进一步研究工作。从烃源岩的低成熟阶段向高成熟和过成熟阶段演化的生烃全过程研究, 也包括各类型生烃源岩排烃效率及滞留状况全过程研究, 使得以往忽略不计的资源量可转化为一定规模的有效资源量, 必将带来资源量的大幅度增长 (邱中建, 等, 2012)。

### 2) 储层目标研究从发现微米至毫米孔喉优良储集层, 向纳米孔喉储集层扩展

常规油气资源的勘探工作目标是发现高产大油气田, 其中关键是必须找到优质的储集层。这些优质储集层包括优质砂岩和优质碳酸盐岩, 主要指标是高孔隙度和高渗透率。然而, 随着勘探工作的逐渐深入和开发技术发展, 发现致密砂岩和致密碳酸盐岩也可以大面积高产油气, 非常致密的页岩也可以聚集油气并且能够进行商业开采。因此, 储集层类型扩展到地壳所有岩类, 储集层评价的目标不再是寻找微米至毫米孔喉的优良储集层, 而是探究是否存在富含油气的条件, 只要致密储层中聚集有一定规模的油气, 就可以用人工的方法将致密储层改造成为商业化的储集层。

例如, 页岩气藏可称为典型的“人工气藏” (王世谦等, 2013)。页岩气的商业开发, 就是大规模采用水平井多段压裂方式对储层进行大规模的人工改造, 使致密页岩含气层转化为具有商业性的产气层。页岩气的成功开发, 为致密砂岩气、煤层气等类似致密油气开发提供了很好的借鉴。

### 3) 油气聚集研究从圈闭向连续或准连续大面积分布的大油气区或层系扩展

传统的石油地质研究认为, 圈闭是油气聚集和富集的最重要场所。油气水的分布受控于浮力作用, 油气都向高处运移, 而密度较大的水, 一般都位于圈闭底部、边部而成为油气藏的边界。因此, 常规油气勘探的主要目标是寻找有利圈闭, 但随着勘探的不断深入, 储集层致密化程度的不断增高, 油气运聚规律将发生部分改变甚至全部改变, 浮力驱动在油气水的分布或运聚过程中显得不是特别重要, 油气膨胀驱动在近距离运聚可形成大面积、连续性分布。致密砂岩油气藏不存在明显或固定界限的圈闭和盖层, 即“无形”或“隐形”或“动态”圈闭, 主要由烃源岩生烃补给与气藏散失的动态平衡控制。因此, 对于油气聚集的研究也逐渐从局部圈闭向大面积、全盆地范围扩展 (如鄂尔多斯盆地上古世界大面积致密砂岩气, 美国页岩大面积含油气)。按照这一理念将可以打破很多以往常规油气勘探的禁区, 使油气勘探进入一个新的认识和发展阶段。

### 4) 从生、储、盖、圈、运、保的综合评价研究向以生烃和保存条件研究转变

传统石油地质的评价方法认为, 油气藏得以形成并保存至今有赖于 6 大要素的具备及时空上的有效配置, 因此油气成藏的地质评价包括对生油层、储集层、盖层、圈闭、运移和保存条件。由于有机质生烃高峰期向生烃全过程的扩展, 页岩气原地富集成藏、致密砂岩近源成藏, 大面积全盆地富集成藏等新思维的出现, 使得油气储层下限不断降低, 油气聚集的圈闭概念逐渐模糊。致密砂岩气成藏研究显示, 储集层、圈闭和运移等条件并不是特别重要的制约因素, 而最为关键的是生烃条件和保存条件。

## 1.2.2 致密砂岩气勘探开发技术发展趋势

### 1. 地震储层预测技术

目前, 在地震装备技术方面, 陆地地震装备已具备 15 万道的带道能力, 海上地震装备已具备 26 缆

能力,未来装备向百万道发展(杜金虎等,2011,邹才能等,2013)。

地震采集技术方面,陆地采集技术在向单检、宽频带、宽(全)方位、高密度、高带道、小面元和提高可控震源的宽频带激发能力,尤其是提高可控震源低频拓展能力等方向发展。海上地震采集技术正向双缆技术、变深度拖缆技术、双检技术、全方位双螺旋采集技术、精确点位控制技术、更深水域勘探技术发展。

在地震处理技术方面,叠前深度偏移、逆时偏移技术成为应用和发展的主流技术,全波形反演技术、各向异性叠前偏移成像技术已经具有良好的应用前景。

地震解释技术方面,油藏地球物理、AVO/AVA 反演、波动方程反演、岩石物理反演以及宽(全)方位地震解释、方位各向异性解释、流体预测等日益完善。多波多分量地震技术、3D3C-VSP、随钻 VSP、井间地震、多分量微地震监测以及时间推移地震技术的研究与应用已成为前缘技术,将有很大的潜力。

针对复杂地表、复杂储层、各向异性地区和开发生产领域,以油气藏为目标进行勘探开发一体化,突出以三维数据体为对象的采集、处理、解释技术集成配套与优化。对于非常规油气,即致密气、致密油、煤层气、页岩气、页岩油等特定类型的油气资源,根据油气资源分布区地质地球物理特点和地面条件,发展相应的地震采集处理解释一体化配套技术。

## 2. 微地震监测技术

微地震监测技术为优化油气藏管理、致密储层勘探开发提供决策依据。微地震不需要人工激发地震子波,又称作无源地震或被动地震(邹才能等,2013)。微地震监测技术在油气藏压裂、注水开采等生产过程中,利用压裂、注水诱发的类似天然地震、烈度很低的微地震现象,监测裂缝活动、油气生产层内流体流动等情况。微地震监测技术能实时提供施工产生的裂隙高度、长度、方位角、几何形状和空间展布等信息,为优化压裂设计、优化井网等开发措施提供重要依据。

低渗透致密砂岩储层虽然普遍发育天然裂缝,但需要经过压裂才能形成工业产能。非常规油气增产、提高采收率以及储量有效动用与压裂作业效果密切相关,微地震监测技术是实时监测压裂效果的一种有效手段。

## 3. 水平井及分支水平井技术

水平井钻井技术是利用特殊井底动力工具与随钻测量仪器,井斜角大于  $80^\circ$ ,并保持这一角度钻进一定长度井段的定向钻井技术。这是近 30 年来迅速发展并日臻完善的一项综合配套钻井技术,包括随钻测量、井眼轨迹控制、井壁稳定、钻井完井液等一系列重要技术(郑俊德等,2005;吴月先等,2008)。与直井相比,水平井具有泄气面积大、单井产量高、穿透度大、储量动用程度高、节约土地占用、避开障碍物和环境恶劣地带等许多优点。因此,水平井钻井技术在提高单井油气产量和提高油气采收率方面具有重要作用,已成为致密砂岩油气、页岩气、煤层气等非常规油气资源高效勘探开发的关键技术。

据统计,目前在全球 60 多个国家和地区完钻水平井总数已超过 5 万口,特别是在美国,随着致密气、页岩气等非常规油气资源的大规模勘探开发,近几年水平井钻井数几乎成指数增长,水平井钻井数从 2000 年的 1144 口增长到 2011 年的 16100 口左右,增长了 13 倍多,水平井数占总井数的比例从 2000 年的 3.9% 增至 2011 年的 30% 左右(史建刚,2008;邹才能等,2013)。水平井钻井技术的进步和大规模应用直接推动了美国致密气、页岩气等非常规油气资源的快速发展,不仅使美国再次成为全球第一大天然气生产国,改变了美国天然气进口的格局和天然气价格,甚至对世界能源供应格局都产生了重要影响。

分支井钻井技术被石油工程技术专家确立为 21 世纪初最具发展潜力的钻井技术之一。多分支井技术是在水平井、定向井的基础上发展起来的,是利用单一井眼(主井筒)钻出若干个进入油气藏的分支井眼,增大油气储层钻穿概率和有效面积,从而提高单井产量及油气藏的最终采收率。分支水平井主要有两种:一种是新钻分支水平井,另一种是老井侧钻分支水平井,从井眼轨迹可将分支水平井划分为栈式、音叉式、欧翅式、鱼骨式等 10 余种类型,还可分为平面分支水平井和空间分支水平井(江怀友等,2011;邹