

国家重点基础研究发展计划（973计划）项目（20140

# 页岩气 地球物理技术

杨勤勇 等编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目( 2014CB239201)资助

# 页岩气地球物理技术

杨勤勇 等编著



中国石化出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

页岩气地球物理技术/杨勤勇等编著.  
—北京: 中国石化出版社, 2018. 2  
ISBN 978-7-5114-4821-7

I. ①页… II. ①杨… III. ①油页岩 -  
地球物理勘探 IV. ①P618.120.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 039593 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者以任何形式或任何  
方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市朝阳区吉市口路 9 号

邮编: 100020 电话: (010) 59964500

发行部电话: (010) 59964526

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: [press@sinopec.com](mailto:press@sinopec.com)

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787 × 1092 毫米 16 开本 20 印张 499 千字  
2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷  
定价: 108.00 元

随着我国工业化进程的快速推进，对外能源依存度不断增加，大气污染严重，为了有效保障国家能源供给安全、优化能源结构、促进节能减排，页岩气作为一种新型优质清洁能源，其地位日益突出。近年来，页岩气开发利用得到了国家的高度重视，国民经济和社会发展“十二五”“十三五”规划都明确要求“推进页岩气等非常规油气资源开发利用”“加快推进非常规油气勘探开发”。据估计，我国页岩气总资源量达  $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，可采资源量达  $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，位居世界首位。但页岩气开发技术难点多，尤其是在我国地表地质条件复杂的南方地区，实现海相页岩气规模性开发是世界级难题。

中国石油化工股份有限公司以自主创新技术为依托，形成了海相页岩气高效开发理论与综合评价技术系列，发现并实现了我国首个大型页岩气田——涪陵页岩气田的商业开发，从而走出了中国页岩气自主创新发展之路。涪陵页岩气田的勘探成果荣获 2014 年度世界页岩油气国际先锋奖，进一步提升了我国在页岩气藏开发领域的国际地位。涪陵页岩气田的成功开发是我国页岩气勘探开发理论创新、技术创新的典范。

页岩气勘探开发实践表明，地球物理技术可以为页岩气勘探开发提供重要的技术支持。地球物理技术在刻画页岩气“甜点”区的空间形态、研究储层的复杂结构特征、储层改造效果监测等方面都有其独特的优势。由中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院杨勤勇等人撰写的这部专著针对页岩气勘探开发过程中面临的主要地质和工程问题，结合中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院近年来在四川盆地页岩气勘探开发实践过程中积累的大量原创性技术，从基础理论和技术原理出发，系统论述了地球物理技术在页岩岩石物理分析、地质甜点识别、工程甜点识别、地震偏移成像以及微地震监测五个方面的最新研究成果，并以四川盆地为例，详细介绍了两个复杂地质条件下的

地球物理应用实例。

本书从我国页岩气地球物理勘探技术需求出发，紧紧围绕页岩气勘探开发中面临的关键问题，提供了先进、实用的配套地球物理技术，是一部可读性强、学术价值与实用价值均较高的专著。本书可作为地球物理专业技术人员的技术参考手册，同时，书中的技术思路与研究实例介绍，对我国未来复杂地区页岩气勘探开发实践亦具有宝贵的指导和借鉴作用。

是为序。



中国科学院院士

中国地球物理学会理事长



# 前言

页岩占据了地球上沉积岩中75%以上的比例,在全球范围内分布十分广泛。以往常规油气藏的勘探开发过程中,页岩往往被看作优质的烃源岩和盖层,对页岩中所含油气的关注和研究比较少,制约了石油工作者对页岩气的深入认识。近年来,特别是随着美国“页岩气革命”的爆发,页岩气的重要性引起了全世界的高度关注。

实践表明,和在常规油气的勘探开发中起到的核心支撑作用一样,地球物理技术可以为页岩气勘探开发提供技术支持,它在刻画页岩气“甜点”区的空间形态、研究储层的复杂特征、监测储层改造措施的实施效果等方面都具有独特的优势。

据美国能源信息署(EIA)预测,不远的将来,世界能源格局将发生重大变化,至2040年,传统的石油、煤炭的消费量将下降或保持当前水平,而可再生资源、核能、天然气将明显增长,其中天然气消费量比2012年增长约66%,年均增长1.8%。从其他机构的预测结果来看,天然气未来将持续增长的观点获得了比较广泛的认同。

页岩气是指以游离、吸附和溶解状态赋存于富有机质泥页岩中的天然气,储集区通常具有低丰度、赋存方式多样、分布连续、低孔、低渗(纳米级孔隙和纳达西级渗透率)的特点,是典型的“自生自储”系统。页岩气的开发一般需要借助水力压裂等储层改造措施,形成裂缝网络并保持其开启,增产措施的设计、实施、监测、评价,都需要物探技术的支持。页岩气的这些特点决定了其勘探开发比常规气藏更加困难,面临的地球物理技术问题也更加复杂。

页岩气的地质和工程特征引起的地球物理技术难点主要有以下几点:

(1) 由于天然气价格的制约,天然气的勘探开发对成本特别敏感,用于页岩气勘探开发的物探技术也必须降低成本。因此,总体而言,在我国,页岩气区的地震资料不会很充分,很多地区甚至无力进行三维地震或者只有老的三维地震资料。这为地震技术的应用带来很大困难。页岩气地震技术可能面临着资料先天不足的困境。

(2) 页岩岩石物理测试受到限制。页岩岩石物理性质与埋深、温度、压

力、含气量、游离/吸附状态、孔隙度、渗透率等多种因素有关,实验室岩心样本的测试结果与地下“原位”岩石状态存在一定的差异,后续物探资料的处理解释在一定程度上会受到这些因素的综合影响。

(3) 页岩气物性参数的提取存在较大困难。由于物探资料不充分、物探资料品质问题、复杂地质情况的制约,页岩气储层厚度、面积、含气性、总有机碳(TOC)含量、脆性矿物含量和镜质体反射率、天然气含量及状态(游离、吸附)等关键要素的确定存在很大的困难,并且求得的结果不确定性程度也较高。

(4) 页岩气“甜点”识别难度大。具备良好的生烃潜力、储集空间以及适合工程开发的页岩气富集区域或层位,是页岩气资源勘探开发的最佳区域,称为“甜点”区。随着页岩气勘探开发的深入,“甜点”又细分为地质甜点和工程甜点两类,前者指页岩气的有利富集区域,后者指可有效工程开发的页岩气富集区。“甜点”区预测需要总有机碳含量、原始地应力大小、裂缝方向及差异、页岩脆性、孔隙度、渗透率等参数,地球物理技术是页岩气储层识别与评价的核心技术,工程甜点的识别可进一步为水平井的精细设计提供依据和指导。

(5) 页岩气储层开发阶段的应用有待尝试。在常规油气勘探开发作业链中,物探技术主要应用于勘探阶段,近年才逐步向开发阶段渗透。而页岩气的开发所提出的物探技术需求早于常规油气,也较常规油气更为迫切。除了页岩气储层产能评价和开发方案编制外,在开发阶段,物探技术还必须提供水平井钻进监测和实时修正建议、水力压裂方案设计、水力压裂评估等服务,必须发展针对这些生产需求的新的物探技术,或者组合运用已有的常规油气的物探技术,来适应新的需求。

随着页岩气勘探开发的深入,遇到的地质和工程问题也日益严峻,为物探技术提供了发挥作用的空间。目前,在页岩气中应用较多的物探技术主要包括:岩石物理技术、地质甜点识别技术、工程甜点识别技术、地震偏移成像技术、微地震监测技术五个方面。

### 1. 岩石物理技术

岩石物理技术是联系储集层特征参数和地震参数的桥梁,地震岩石物理研究是建立岩石物理性质和油藏基本参数之间关系的主要途径,能够认识储层性质与地震响应、地震属性间的关系,在岩石物性参数求取、定量化解释等环节发挥重要作用。

实验室岩石物理测试分析的难点在于:页岩储层的纳米级孔隙导致孔隙喉道太小,使有效孔隙体几乎不连通,常用的流体置换测量孔隙难以实现;复杂的流体结构导致气体流动过程中滑脱效应和表面交互张力起主导作用,使得气



体的流动模式不再满足基于达西定律的常规测量；吸附效应的影响会导致渗透率测量结果偏低；页岩易碎易分散，其速度的实验室测定也非常困难。

数字岩石物性技术（DRP）越来越受到业内的青睐。DRP 可以对物性参数进行定量化分析，分析结果有助于解释渗透率随复杂的孔隙结构而相应改变这一现象。具体方法是：首先使用环境扫描电镜（ESEM）选取有代表性的多个视域岩心薄片高质量的灰度图像；然后对图像进行二值化，标识出孔隙；最后用轮廓提取和轮廓跟踪技术得出二值图像各个孔隙的边界形态特征，计算出各孔隙的相关参数，换算为实际孔隙参数。根据各种含有机质页岩的孔隙成像可以看出，有机质以各种形式存在。这些孔隙类型大多数受干酪根类型和热成熟度的控制，而且它们对孔隙度、渗透率以及整体页岩储集层品质的影响很大。

对于页岩力学性质，主要研究的是杨氏模量和泊松比，通过微观性质到宏观性质的过渡，来研究页岩速度变化的规律。常规研究页岩力学性质的方法主要有两种：静态测量方法和动态测量方法，静态方法通过测量应力应变来计算弹性系数，动态方法通过测量纵横波速度来计算弹性系数。无论是静态测量还是动态测量，测量过程中的压力场控制是非常重要的。应力场预测方法是基于各向同性介质模型的，在此基础上考虑压力各向异性，但是这种预测是不够准确的。页岩储层各向异性会导致反射地震数据的速度异常及错误的成像位置，尤其是在复杂的地质构造区，做时-深转换更应该考虑到由速度各向异性引起的旅行时及速度畸变。

## 2. 地质甜点识别技术

页岩气地质甜点的主要因素有：储集层厚度、TOC 含量、孔隙度、渗透率、构造、裂缝等。

经济合理的页岩气开发必须满足一定的参数标准，如页岩的埋深、厚度、有机质丰度和含气性等。通常将具有一定开发价值的页岩气称为地质甜点。页岩气地质甜点地震预测和评价思路是：从页岩气富集的地质要素出发，充分利用地质、地球物理、地球化学、测井、岩心分析化验等资料，基于地震属性、叠前/叠后反演等技术手段，利用地质甜点评价核心参数，优选出最佳勘探开发区域和层位。

页岩储层孔隙压力越大，孔隙等空间内气体饱和度越高，游离气含量进而增加。因此，页岩储层孔隙压力与游离气含量呈明显的正相关关系，并直接影响到开发过程中的初始产能。

页岩储层中，天然裂缝的存在增加了页岩气储集空间，提高了页岩的渗透率，增加了游离态天然气的赋存体积，有利于吸附态天然气的解析。裂缝又是力学上的薄弱区域，提高了进行页岩储层压裂的可能性。



### 3. 工程甜点识别技术

页岩气工程甜点选择的主要原则是产量较高，能够通过压裂等增产措施保证较长的高产期。页岩气工程甜点的主要指标包括地应力、脆性等参数。

页岩气开发大多采用水平井压裂技术，水平地应力的分布、发育方向和强度是页岩气开发必须考虑的重要因素。

地应力是影响页岩气产量的主要因素之一。地层压力越大，气体分子与岩层接触面积越大，页岩吸附气体的能力加强，吸附气含量高。因此，地应力与吸附气、游离气的含量有着正相关性，应力越大，页岩的吸附能力就越大，吸附气的含量也就越高。游离气含量也会随着压力的增加而增加。

页岩的脆性直接影响着进行水力压裂的可能性和水力压裂实施的效果。页岩的脆性越高，越容易产生裂缝。决定页岩脆性的评价标准主要是杨氏模量和泊松比。杨氏模量代表着材料的刚性，泊松比表示材料的横向变形系数。不同的杨氏模量和泊松比的组合表示岩石具有不同的脆性，通常来说，杨氏模量越大、泊松比越低，则页岩的脆性越高。

### 4. 地震偏移成像技术

页岩气水平井井位部署和地震成像息息相关，成像的质量决定了页岩气水平钻探的成功率，尤其是储层的位置正确成像对现有的地震成像技术提出了更加苛刻的要求。

页岩储层的特征决定了它普遍具有较强的各向异性的特性。传统地震偏移成像处理主要是以完全弹性和各向同性的物理假设为理论基础，往往会导致成像精度不高、地震分辨率降低、经常存在成像深度与实际位置偏差的问题。为了更精确地刻画地下地质构造，研究地震各向异性偏移成像方法是十分必要的。将各向异性偏移技术应用于页岩气领域也是新的技术发展方向，并已取得较好的应用效果。

### 5. 微地震监测技术

微地震监测技术已广泛应用于水力压裂裂缝监测、油藏动态监测、注水监测等业务领域，获得了石油工业界的高度认可。

微地震监测的主要作用有：开发动态监测，对油气田开发过程中孔隙流体的运动前缘、热驱时被加热区空间的变化进行监测，掌握地层裂隙状态、提高产能；描述断层的封堵性能；通过速度成像和横波各向异性分析成像储层内流体流动的各向异性；对微地震震源机制的研究，可提供有关油藏内部变形机制、流体流动的分布和压力前缘的移动情况；描述人工裂缝网络生长情况，评价压裂措施实施效果，预测裂缝及微地震活动性的发展，及时调整压裂施工方案。微地震监测和其他井中、地面地球物理技术结合起来，能够大大降低储层监测的周期和费用。

一些新型压裂技术正在研究、应用中,如泡沫压裂、超临界二氧化碳压力等。这些新压裂技术,其最终效果是提高人造裂缝网络的范围、密度以及复杂程度,增加裂缝的长度和宽度,而这些结果,引起的微地震异常将更加明显,从而大大改善微地震技术面临的有效信号弱的处境。因此,可以预计,微地震技术针对新的压裂改造方式的监测、评价将更为有效。

本书为中国石油化工股份有限公司石油物探技术研究院多年以来页岩气勘探开发物探技术的成果总结,紧密围绕上述在页岩气勘探开发中发挥重要作用的五大物探技术介绍了多个科研、生产项目的技术研发、技术进展及应用成果。

本书共分为六章。第一章为页岩岩石物理研究,第二章为页岩气地质甜点地震预测技术,第三章为页岩气工程甜点地震预测技术,第四章为页岩气各向异性偏移成像技术,第五章为页岩气开发微地震监测技术,第六章为页岩气地球物理技术应用实例。

本书由杨勤勇负责全书的筹划、各章节内容的确定、初稿的修改、全书的统稿等工作。参与本书编写工作的有:陈伟、马中高、李博、胡华峰、腾龙、崔树果、陈勇、孙振涛、林正良等。由于编著者水平有限,文中错误和不妥之处敬请读者批评指正。

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章 页岩岩石物理研究 .....         | 1  |
| 第一节 页岩气储层特征 .....          | 1  |
| 一、沉积特征 .....               | 1  |
| 二、矿物成分分布特征 .....           | 2  |
| 三、有机质分布特征 .....            | 5  |
| 四、孔隙类型及其分布特征 .....         | 8  |
| 五、孔渗特征 .....               | 12 |
| 第二节 页岩岩石物理特征 .....         | 13 |
| 一、页岩岩石物理参数测试 .....         | 13 |
| 二、矿物组分、孔隙度和 TOC 间的关系 ..... | 19 |
| 三、矿物对弹性参数的影响 .....         | 21 |
| 四、TOC 含量对弹性参数的影响 .....     | 22 |
| 五、压力对弹性参数的影响 .....         | 24 |
| 六、页岩各向异性特征 .....           | 26 |
| 第三节 页岩岩石物理建模 .....         | 29 |
| 一、页岩岩石物理建模思路 .....         | 29 |
| 二、岩石物理模型的建立 .....          | 31 |
| 三、数字岩石物理建模 .....           | 35 |
| 四、岩石物理模型的应用 .....          | 45 |
| 第四节 页岩岩石物理分析 .....         | 50 |
| 一、页岩脆性识别敏感性参数研究 .....      | 50 |
| 二、页岩 TOC 含量预测敏感参数研究 .....  | 53 |
| 三、储层地应力敏感性参数探索研究 .....     | 55 |
| 四、水敏性实验分析 .....            | 59 |



|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>第二章 页岩气地质甜点地震预测技术</b> | 64  |
| 第一节 页岩储层有机质丰度地震预测技术      | 64  |
| 一、页岩富含有机质地震波场特征          | 64  |
| 二、页岩储层 TOC 含量地震预测方法      | 66  |
| 第二节 页岩储层压力预测技术           | 75  |
| 一、常规地层压力预测方法             | 75  |
| 二、页岩储层测井地层压力预测           | 80  |
| 三、页岩储层地震地层压力预测           | 89  |
| 第三节 页岩储层含气性识别技术          | 95  |
| 一、页岩储层叠后地震多属性含气性预测技术     | 95  |
| 二、页岩储层叠前地震反演含气性预测技术      | 97  |
| 三、频变 AVO 含气性识别技术         | 98  |
| 第四节 页岩气裂缝识别              | 100 |
| 一、相干技术                   | 100 |
| 二、叠前方位各向异性裂缝检测           | 101 |
| 三、裂缝成像技术                 | 103 |
| 四、曲率技术                   | 104 |
| 五、边缘检测技术                 | 105 |
| 六、蚂蚁追踪算法                 | 105 |
| 七、非线性方法裂缝预测              | 105 |
| 八、裂缝综合分析                 | 105 |
| <b>第三章 页岩气工程甜点地震预测技术</b> | 108 |
| 第一节 地震波在方位各向异性介质中的传播     | 108 |
| 一、P 波在方位各向异性介质中的传播       | 109 |
| 二、方位各向异性介质分界面上的反射系数      | 110 |
| 三、等效 HTI 介质理论            | 115 |
| 第二节 贝叶斯 AVA/AVAZ 反演      | 118 |
| 一、贝叶斯反演方法                | 118 |
| 二、贝叶斯线性 AVA 反演与不确定性分析    | 121 |
| 三、贝叶斯 AVA 反演与储层脆性预测      | 131 |
| 四、贝叶斯 AVAZ 反演与应力预测       | 141 |



|                              |     |
|------------------------------|-----|
| <b>第四章 页岩气各向异性偏移成像技术</b>     | 149 |
| <b>第一节 各向异性介质基本波动理论</b>      | 150 |
| 一、各向异性介质波动方程及 Christoffel 方程 | 150 |
| 二、各向异性介质中的对称性                | 152 |
| 三、TI 介质的 Thomsen 参数表征        | 154 |
| 四、VTI 介质弹性波相速度与群速度           | 155 |
| 五、TTI 介质弹性波相速度与群速度           | 157 |
| <b>第二节 各向异性介质参数建模技术</b>      | 163 |
| 一、TTI 介质各向异性参数初始建模           | 165 |
| 二、TTI 介质各向异性参数层析反演           | 170 |
| <b>第三节 各向异性 RTM 成像技术</b>     | 185 |
| 一、拟声波近似及其控制方程                | 186 |
| 二、从拟声波近似到纯声波近似               | 190 |
| 三、TI 介质标量波 RTM 的技术要点         | 200 |
| <b>第五章 页岩气开发微地震监测技术</b>      | 204 |
| <b>第一节 微地震采集观测系统设计</b>       | 205 |
| 一、地面观测系统设计                   | 205 |
| 二、井中观测系统设计                   | 214 |
| <b>第二节 地面微地震资料处理</b>         | 218 |
| 一、速度模型的建立                    | 219 |
| 二、静校正量计算                     | 220 |
| 三、微地震事件定位                    | 221 |
| 四、噪声压制                       | 226 |
| <b>第三节 井中微地震资料处理</b>         | 232 |
| 一、检波器的旋转定位                   | 233 |
| 二、井中微地震震源反演定位                | 236 |
| <b>第四节 微地震解释</b>             | 244 |
| 一、微地震地质力学参数                  | 244 |
| 二、综合压裂工程数据解释                 | 250 |
| 三、裂缝几何形态计算                   | 252 |
| 四、微地震事件时空模式识别                | 253 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 五、微地震综合解释 .....                       | 253        |
| <b>第六章 页岩气地球物理技术应用实例 .....</b>        | <b>257</b> |
| 第一节 页岩气“甜点”预测技术在中国南方页岩气 A 地区的应用 ..... | 257        |
| 一、研究区概况 .....                         | 257        |
| 二、地震处理技术及应用效果 .....                   | 258        |
| 三、页岩气“甜点”预测技术及应用效果 .....              | 269        |
| 第二节 页岩气“甜点”预测技术在中国南方页岩气 B 地区的应用 ..... | 279        |
| 一、研究区概况 .....                         | 279        |
| 二、地震处理技术及应用效果 .....                   | 280        |
| 三、页岩气“甜点”预测技术及应用效果 .....              | 285        |
| <b>参考文献 .....</b>                     | <b>290</b> |

### 第一节 页岩气储层特征

页岩气产自富有机质页岩，页岩气藏是自生自储连续型富集气藏（陈更生等，2009；邹才能等，2010；张金川等，2004、2008）。页岩气储层具有矿物颗粒和层理结构精细、渗透率极低、孔隙多尺度、气体储集流动特征独特等特点（董大忠等，2011），增加了对页岩岩石物理性质研究的复杂性。页岩气储层特征的认识是储层评价的关键，也是开发实施开发方案的基础。

#### 一、沉积特征

页岩是广泛存在于地壳中的一种沉积岩。页岩气能否达到具有开采价值的标准与页岩的沉积和岩相特征密切相关，它至少具备两个基本条件：含有丰富的有机质和较多的脆性矿物组分。这种类型的页岩沉积有利区一般发育在有限的局部地区和特殊的地质时期。

富含有机质的页岩可以在多种环境下沉积，但是页岩沉积初期有机物的富集程度、成岩过程中有机质的保存程度、陆源碎屑物的供给，都会对页岩有机质的丰都产生重要影响。

从北美典型页岩气藏的研究发现，最有利的页岩气储层是在较深的静水缺氧环境下饥饿性沉积的，由水循环受到限制、生物需氧量超出供应量等原因形成，以海进体系域为佳，同时需要大量的有机生物沉积，使得页岩中含有较多的生物硅质或钙质以及一定量的黏土，从而使页岩具有很高的脆性。聂海宽等（2010）将美国主要页岩沉积环境归为三类：①克拉通盆地内坳陷沉积。在泥盆纪，随着全球海平面的上升，Michigan 和 Illinons 盆地被海水淹没，成为浅海环境，沉积了大量富含有机质的页岩，以美国的 Antrim 和 New Albaby 页岩为代表。②被动大陆边缘裂谷和缓坡陆棚环境。该环境在上升洋流控制下携带生物大量繁殖所需要的营养物质，表层海水中生物大量繁殖，死亡后在海底快速堆积，耗尽海底的氧而形成强还原环境，利于有机物的保存。③前陆挠曲形成滞留盆地。特殊构造背景阻止了水的侧向运动，表层含氧水与深层水的混合受阻，有利于还原环境的形成和有机质的保存。

四川盆地东南 FL JSB 地区下志留统 LMX 组页岩层系从下向上依次由深水陆棚相



逐渐过渡为浅水陆棚相沉积。从海侵体系域到高位体系域,保持长时间的深水缺氧环境,为有机质堆积、保存提供了有利场所,从而沉积了岩性较单一、细粒、厚度大、分布广、富含生物化石的富有机质页岩。LMX 组上部是浅水陆棚相沉积,其水体相对深水陆棚相较浅,水深一般处于 20~40m,属于水低能环境。沉积物以暗色陆源泥级碎屑物质为主。主要岩性为一套暗色含碳含粉砂页岩、含碳含粉砂泥岩及含粉砂泥岩相间组成的微相沉积体。中部是盆地边缘上斜坡相沉积,主要岩性为灰色—深灰色含粉砂含碳泥岩、灰色粉砂岩。下部是深水陆棚相沉积,水深一般处于 40~200m,属静水环境。岩性主要为一套灰黑色泥岩、页岩、含粉砂页岩。其中,暗色页岩常具毫米级纹层状或片状页理构造。

## 二、矿物成分分布特征

页岩气储层无机矿物成分中硅质矿物含量较高,另外还含有方解石和长石等矿物。所含硅质主要为自生石英,其增加了岩石的脆性,易产生天然和诱导裂缝,从而增加气体存储量和内部微孔的连通能力。页岩层中普遍含有黄铁矿和磷酸盐矿物(磷灰石),主要是缺氧环境沉积的产物,磷酸盐矿物(磷灰石)可能为上升流作用的结果。另外,页岩层局部含有一定数量的黏土矿物(含量一般不超过 50%),这一方面会增加页岩层的吸附气,但另一方面可能会降低页岩层的脆性。页岩岩性致密,颗粒一般小于 0.005mm,页岩颗粒分选较差(陈尚斌,2011)。

FL JSB 地区 WF-LMX 组泥页岩主要呈薄层或块状产出的暗色或黑色细粒沉积岩,它们在化学成分、矿物组成、古生物、结构和沉积构造等方面丰富多样。

JSB 地区页岩气取心井比较少,目前只有 6 口直井。由于 JSB 页岩气的商业开发掀起了学者们对页岩研究的热潮,页岩岩心的需求量大,而井下岩心有限,仅采集了 36 块,因此,我们在分析岩心样品的同时采集了三条地质剖面的近地表样品共 49 块进行对比分析。这三条页岩地质剖面都位于四川盆地东南缘,与 WF-LMX 组下部高 TOC 含量黑色页岩主要沉积范围相吻合。该沉积区面积较大,因构造造成的深水环境而形成的缺氧深水陆棚有利于有机物保存。

岩石中各种矿物由化学元素按照一定的结构排列而成,因此想要准确地判定岩性首先要知道矿物组成,这也是目前在石油地质领域广泛应用的一项技术标准。而 X 射线衍射全岩分析就是利用了这一标准,对样品进行分析获得样品的化学元素组成,然后将获得的测试数据与标准的或已知的各类岩性的化学元素组成数据进行比较,从而获得测试样品的岩性。

对 JSB 地区 WF-LMX 组下部页岩岩心样品和三条 LMX 组页岩剖面近地表样品进行 X 射线衍射全岩分析和黏土矿物类型分析,矿物组分含量分布情况如图 1-1 所示,分析发现岩心样品脆性矿物(石英、长石、黄铁矿、碳酸钙)含量平均为 63.74%,黏土矿物含量平均为 35.61%。

X 射线分析表明,页岩矿物含量复杂,含有黏土(伊利石、伊蒙混层、高岭石、绿泥石)、方解石、石英、长石、铁质白云石、菱铁矿、黄铁矿、硬石膏等。其矿物组成纵向



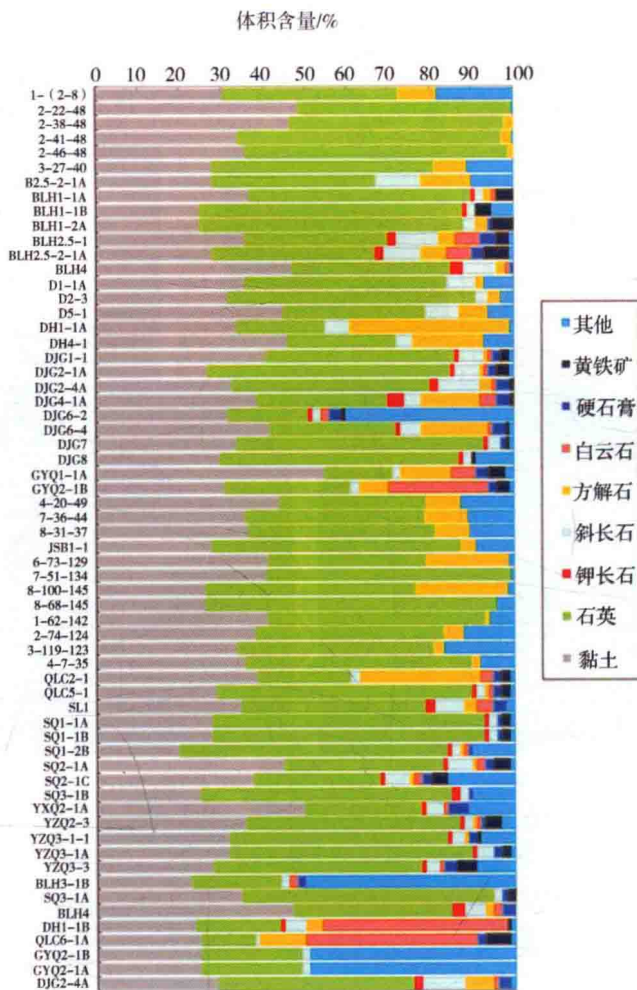


图 1-1 样品的矿物组分含量分布情况

变化大, 自下而上总体表现为碳酸盐高→低→高、硅质低→高→低以及黏土矿物低→高的变化趋势, 其中碳酸盐和黏土矿物因受古地理和古水深控制而波动幅度更大。岩性和矿物组成变化特征显示, LMX 组页岩储层纵向非均质性较强。

将岩石矿物组分绘制于三角图中 [图 1-2 (a)、(b)], 按照 Passey 等 (2010) 对不同页岩的研究绘制矿物组分三元图 [图 1-2 (c)], 根据矿物组分的分布将页岩划分为富含黏土的页岩和富含石英的页岩两大类, 这两类页岩的地球物理特征具有明显的不同, 在岩石物理建模中必须考虑。从图 1-2 可以看出 FL 地区 LMX 组主要属于富“砂”型页岩气储层。

### 1. 黏土矿物形态特征

从显微镜下观察发现, JSB 地区 LMX 组页岩中的黏土以伊利石为主, 在扫描电镜下观察到伊利石晶体呈层状沿着页岩层面分布, 黏土形态为长纤维状或长条状, 大部分黏土颗粒纵横比小于 0.1, 可见水平纹层发育、笔石化石定向排列的分布特征 (图 1-3)。