

国家自然科学基金项目资助

地震岩石物理学 分析方法及应用实践

熊晓军 贺锡雷 李 翔 等 编著

Seismic rock physics analysis methods
and applications

.2

四川科学技术出版社

国家自然科学基金项目资助

本书研究与出版获得了国家自然科学基金项目
(41274130、41204068) 的经费资助

地震岩石物理学 分析方法及应用实践

熊晓军 贺锡雷 李 翔 等 编著

Seismic rock physics analysis methods
and applications

四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

地震岩石物理分析方法及应用实践/熊晓军等编著. —成都 :
四川科学技术出版社, 2016.3

ISBN 978 - 7 - 5364 - 8313 - 2

I. I. ①地… II. ①熊… III. ①地震 - 岩石物理学 - 研究
IV. ①P315.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 040185 号

地震岩石物理分析方法及应用实践

出品人 钱丹凝
编 著 熊晓军 贺锡雷 李 翔等
责任编辑 任维丽
责任出版 欧晓春
出版发行 四川科学技术出版社
成都市槐树街2号 邮政编码 610031
官方微博: <http://e.weibo.com/sckjcb>
官方微信公众号: sckjcb
传真: 028 - 87734039

成品尺寸 185mm × 260mm
印张 11.25 字数 270 千

印 刷 四川泰吉印刷有限责任公司
版 次 2016 年 3 月第一版
印 次 2016 年 3 月第一次印刷
定 价 35.00 元

ISBN 978 - 7 - 5364 - 8313 - 2

■ 版权所有 · 翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

■ 如需购本书, 请与本社邮购组联系。

地址/成都市槐树街2号 电话/(028)87734035 邮政编码/610031

本书主要编写人员

熊晓军 贺锡雷 李 翔

徐明华 杨 宁 林华伟

前言

地震岩石物理学是一门新兴的交叉学科，其主要特点在于应用性强，即将岩石物理学的分析方法和结论应用到地震勘探领域，从而有效地进行储层预测与气水识别。因此，地震岩石物理学的终极目标又落实到基于地震资料预测岩石的各项参数，如孔隙度、体积模量、饱和度、渗透率、泊松比等。

油气地震勘探技术经过了近几十年的蓬勃发展，已逐渐从粗放式发展转向精细研究。比如构造形态及阻抗预测分析已成为了常规技术，储层预测在某些油田或工区都已经成为常规技术，即不再是研究的难度问题。那目前的难点是什么？或者油气地震勘探领域的学者又畏惧着什么？随便翻阅近期的学术杂志，就会发现大量的学术论文都在讨论地层岩石的孔隙度、渗透率、气水关系、孔隙流体压力、地应力等等，从这里就能捕捉到精细化研究的方向。笔者认为，精细化研究包含两个因素：一是提高现有方法的精度（即高精度），二是细化研究目标（即研究岩石的骨架、孔隙、流体）。从这个研究目标来说，常规的地震勘探技术已难以担当大任。此时，地震岩石物理学应势而生，较好地架起了勘探地震学与岩石物理学的桥梁，增加了“精细化”研究的信心。

目前，国内已有一些关于岩石物理学或地震岩石物理学方面的专著，如《岩石物理手册》（Mavko 等，2008）、《岩石物理学》（陈颀等，2001）、《岩石物理学进展与评述》（巴晶，2013）、《储层岩石物理学》（范晓敏等，2011）、《测井解释岩石物理基础》（荆万学，2013）、《地震岩石物理学及其应用研究》（王炳章，博士论文，2008）等等。与上述专著不同的是，本书重点讨论“岩心的岩石物理测试与分析”和“岩石物理模型分析”的方法理论及其实际应用，其中包含了笔者及研究团队在该领域的最新研究成果、实验室的测试数据和一些常规岩石物理模型分析的详细程序设计及程序源代码。如果将 Mavko 等的《岩石物理手册》比作字典，那么本书的目标就是教会读者如何使用这些“字”，造出完美的“句子”。

本书的内容包含 5 个章节，包含了岩石物理学和地震岩石物理学的基本理论、岩心的岩石物理参数测试与分析、岩石物理模型分析方法、岩石物理模型的应用实践以及岩石物理模型的程序设计等内容。

本书从工程应用的角度出发，侧重于如何实现并公开相关的测试数据和程序代码，为地震岩石物理学领域的工程技术人员和科研人员提供基础数据和技术支撑。对于方法理论部分，本书仅摘录了与方法或技术的具体实现相关的最核心的部分，便于读者掌握和应用这些方法或技术。因此，需要说明的是，本书第 1 章和第 4 章涉及的岩石物理学的方法理论部分，摘录或引用了前人的一些经典文献和专著的内容，如 Mavko 等的《岩石物理手册》、张卫海等的《石油地质勘探概论》等等，感谢这些前辈在岩石物理学的理论方法的研究，是他们过去和现在的工作，才使得地震岩石物理学具备了坚实的理论基础。如果读者想进一步深入地了解书中的方法或理论，请查阅本书的参考文献所列出的专著和文献。

感谢国家自然科学基金项目“Gassmann 方程的关键技术研究及其应用”（编号：41274130）和“地震解释中的图像增强若干理论与应用研究”（编号：41204068）的资助。

感谢成都理工大学贺振华教授、曹均研究员、林凯博士，四川大学刘建峰副教授，中海石油（中国）有限公司天津分公司周东红教授级高级工程师、彭刚高级工程师、张平平高级工程师对本书提出的宝贵意见及帮助。

作者希望本书能对从事油气勘探与开发的物探工作人员及工程技术人员有所帮助，也可作为大专院校的教材。

鉴于作者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

成都理工大学 熊晓军

2015 年 12 月

目 录

第 1 章 基本理论	1
1.1 岩石物理学的基本理论	1
1.1.1 地层	1
1.1.2 沉积岩	3
1.1.3 油气的储集岩	8
1.2 地震岩石物理学的基本理论	10
1.2.1 地震岩石物理学的定义	10
1.2.2 地震岩石物理学的国内外研究现状	11
1.2.3 地震岩石物理学研究方法	13
第 2 章 岩心的岩石物理参数测试与分析	15
2.1 岩心样品的测试方法	15
2.1.1 样品的采集与制样	15
2.1.2 岩石物性参数的测试方法和仪器	17
2.1.3 岩样储层物性参数的测量	21
2.2 砂岩岩心样品的测试与分析实例	22
2.2.1 岩石样品概况	22
2.2.2 测试方案	24
2.2.3 测试数据	27
2.2.4 测试数据分析及规律认识	32
第 3 章 岩石物理模型分析方法	44
3.1 基质矿物的等效介质理论	44
3.1.1 Hashin-Shtrikman 模型	44
3.1.2 Voigt-Reuss-Hill 模型	48
3.2 流体的等效介质理论	51
3.2.1 Wood 公式	51
3.2.2 Brie 公式	52
3.3 孔隙介质模型的等效介质理论	53
3.3.1 Gassmann 方程	53
3.3.2 等效模量的自相容近似 (SCA)	56
3.3.3 微分等效介质模型 (DEM)	60
3.4 裂隙介质模型的等效介质理论	61
3.4.1 Hudson 模型	61
3.4.2 Eshelby-Cheng 模型	65
第 4 章 岩石物理模型的应用实践	69
4.1 岩石物理模型与横波速度估算	69

4.1.1 碎屑岩横波速度估算	69
4.1.2 碳酸盐岩横波速度估算	76
4.1.3 页岩横波速度估算	87
4.2 岩石物理模型与流体替换分析	92
4.2.1 碎屑岩的流体替换方法	92
4.2.2 碳酸盐岩的流体替换方法	93
4.2.3 流体替换的实例分析	95
4.3 岩石物理模型与地震波场数值模拟分析	105
4.3.1 单程波动方程地震波场数值模拟基础.....	105
4.3.2 基于 Hudson 裂隙理论的 MIVMAS 地震数值模拟.....	116
4.3.3 塔中某区的地震数值模拟实例分析.....	128
第 5 章 程序附录.....	134
附录 5-1: HASHIN-SHTRIKMAN 模型的程序代码.....	134
附录 5-2: VOIGT-REUSS-HILL 模型的程序代码.....	140
附录 5-3: WOOD 模型程序代码	142
附录 5-4: BRIE 公式计算程序代码	144
附录 5-5: GASSMANN 方程计算程序代码.....	145
附录 5-6: 等效模量的自相容近似 (SCA) 程序代码	146
附录 5-7: HUDSON 模型程序代码	151
附录 5-8: ESHELBY-CHENG 模型程序代码.....	160
附录 5-9: XU-WHITE 模型程序代码.....	165
参考文献	170

第1章 基本理论

1.1 岩石物理学的基本理论

1.1.1 地层

一、地层单位

为了统一地划分地层和编制统一的地质年代表，我们需要制定一套等级不同的地层单位及与之相应的地质年代单位。划分地层所采用的单位一般分为两类：适用于大范围的地层划分单位和适用小范围的地层划分单位。

(1) 国际性与大区域的地层单位

国际性与大区域的地层单位是以生物演化的不同阶段作为基本依据而划分的地层单位，它仅提供地层的相对年代，又称为年代地层单位，分宇、界、系、统、阶、带六级地层单位。

宇：为最大地层单位。根据生物出现的显著与否，把地层划分成两个字。没有显著生物出现的古老地层称为隐生字。有显著生物出现的较新地层总称为显生字。

界：在宇中所划分的次一级地层单位叫界。隐生字内，目前尚无国际上的统一划分。有的地质工作者把隐生字称为前古生界或前寒武系。有的把隐生字划为两个界：老的叫太古界，新的叫元古界。在显生字内根据生物演化的主要阶段划分为三个界。从老到新分别称为古生界、中生界、新生界。

系：在界中所划分的次一级地层单位叫系。系的划分主要依据地壳有节奏的运动所造成的沉积旋回、古地理特征及生物群的变化等。古生界中从老到新依次分为寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系；中生界分三个系，从老到新为三叠系、侏罗系、白垩系；新生界分两个系，从老到新为第三系和第四系。

统：在系中所划分的次一级地层单位叫统。它是根据生物的科目发展演化的阶段来划分的。“统”一般二分或三分。如寒武系从老到新分为下寒武统、中寒武统和上寒武统，二叠系分为下二叠统和上二叠统。

宇、界、系、统都是国际性的地层单位，其中统也可作为大区域地层单位。它们的名称和上、下界线要求各国一致。因为这些大的地层单位仅反映生物发展的大阶段，而生物发展的大阶段在全球范围内是一致的。

阶：在统内划分的次一级地层单位叫阶。阶是以古生物属种演化的较小阶段来划分的，阶的划分不可能适用于全球，因此，阶的名称只适用于同一生物地理区。

(2) 地方性地层单位

为了反映一个地区的沉积环境特征或因化石稀少难以分出阶、统或系的界线，因而制定一套以岩石特征为主要依据的、适用于小范围的地方性地层单位（或岩石地层单位），称为地方性地层单位，如群、组、段、带。

群：是最大的地方性地层单位。包括很厚的组分或不同的岩层，其范围通常相当于一

个统，有时大于一个统，以至相当于一个系，或更大一些，如建德群、鸡西群、昆阳群等。

组：是最基本的地方性地层单位，在实际工作中使用最普遍。组的含义具有岩性、岩相、变质程度的统一性。组的范围一般相当于阶或略小于阶，有时可以比阶的范围还大，甚至达到统的规模如飞仙关组、杨柳岗组、栖霞组等。

在组与群的关系上，组不一定集合为群，但群可以包含几个组。

段：组有时可划分为段，是小于组的地方性地层单位。段的划分主要依据岩性特征。

带：是指一个或几个标准化石属种所分布的地层范围，一般小于段，也可相当或稍大于段，但不超过组。

带可以是地方性的地层单位，也可以是大区域性的地层单位。

国际性地层单位与全国性或大区域性地层单位及地方性地层单位的关系如表 1-1-1 所示。

表 1-1-1 地层单位之间的关系

国际性的地层单位	全国性的或大区域性的地层单位	地方性的地层单位
宇		
界		
系		
统	统	群
	阶	组
		段
	带	带

二、基于岩石地层学的地层划分方法

岩石是地壳发展历史的产物，岩石本身的特点是受它形成时的环境条件决定的。不同时代的地层是在不同时间、不同环境下形成的，所以岩石本身的特点就能反映当时地壳运动和沉积环境的特点，就可以作为划分地层的依据。这种利用岩石特征划分、对比地层的方法称为岩石地层学方法。该方法是地层学中十分重要的方法，其对含化石稀少的地层尤为重要。即使是含化石丰富的地区，在确定具体的地层界线或区域地层对比时，也必须结合岩石地层学方法进行工作。其主要方法有以下几种：

(1) 岩性法

岩石的岩性特征受地理环境控制，因此可以根据岩性特征（如岩石的颜色、成分、结构、构造等）划分对比地层。但这种方法仅能在小区域内应用，例如在大比例尺的地质填图中就经常采用。

(2) 标志层法

在地层剖面中，某些厚度不大、岩性稳定、特征突出和容易识别的岩层可以作为地层划分和对比的标志，称为标志层。例如华北地区下寒武统馒头组顶部有一层鲜红色易碎页岩，厚度不仅大而且稳定，自辽宁经山东、河北直到河南均有出露，所以这一层就是划分、对比我国北方下寒武统顶界的一个很好的标志层。

(3) 沉积旋回法

由于地壳升、降运动的影响,海盆区海水深度频繁变化,因而引起沉积物有规律地变化,在一个地层剖面中表现为岩性自下而上出现有规律的排列和重复。如砂岩—黏土岩—泥灰岩—灰岩,接着又是以砂岩开始逐步过渡到石灰岩。这种现象叫沉积旋回。它可以反映地壳发展历史的自然阶段,所以可以作为划分地层的依据。

(4) 重矿物法

不同时期和不同环境的沉积物中,各种矿物组合、共生关系、颗粒大小和滚圆度都有所不同。我们利用岩石中各种矿物组合和共生关系的特征划分对比地层的方法,称为矿物学的方法。这种方法以岩石中特有的、性质稳定的重矿物(如锆石、石榴子石、电气石等)作为标志。根据标志矿物的特征,组合的种类和数量的不同来划分对比地层的方法,称为重矿物法。这种方法一般只适用于小范围内的地层划分和对比。

岩石地层学方法比较直观,易于掌握,也有一定的科学根据,但它只能确定岩层的相对新老关系,不能确切说明地层的时代,因此必须和其他地层学方法(如生物地层学方法)结合使用。至于应用范围一般是在海相沉积的较小范围内,用来划分和对比地层比较有效。因为有关岩石特征的形成,首先取决于它们的形成环境,而不是它们的年代,在同一时间的不同环境里,可产生完全不同的岩石、沉积特征,如标志层可以变成另一种或完全不存在。至于陆相地层,横向变化更大,即使在一个小范围内也可能完全相同,所以运用岩石学方法时必须慎重。

1.1.2 沉积岩

一、陆源碎屑岩

陆源碎屑岩是由主要内陆源碎屑物质组成的沉积岩,包括砾岩、砂岩、粉砂岩和黏土岩。因为这类岩石以碎屑岩为主体,所以常简称为碎屑岩。

(1) 陆源碎屑岩的组成

根据陆源碎屑岩内各组成部分的成因和结构特征,将其划分为颗粒、杂基、胶结物和孔隙,其中杂基和胶结物称为填隙物。

① 颗粒

碎屑岩的颗粒是从母岩继承下来的陆源碎屑物质沉积形成的组分,是母岩机械风化的产物,又叫碎屑,包括陆源矿物碎屑(矿屑)和各种岩石碎屑(岩屑)。由于其颗粒占陆源碎屑岩组成的50%以上,所以陆源碎屑岩的性质主要取决于颗粒组分的性质。

矿屑:目前已经发现的碎屑矿物约有160余种,最常见的约有20种。但在一种碎屑岩中,其主要碎屑矿物通常不过3~5种,主要有石英、长石、云母等。

岩屑:是母岩的碎块,又叫岩块,是保持着母岩结构的矿物集合体。因此,岩屑是提供沉积物来源区岩石类型的直接标志。岩屑通常在砾岩中含量最高,砂岩中只存在具有细粒结构及隐晶结构的岩屑。更细的沉积岩中几乎不含岩屑。

② 填隙物

碎屑岩中充填在颗粒间的固体物质称为填隙物,可以分为杂基和胶结物。

杂基:杂基是碎屑岩中粒度远小于颗粒的细小的机械成因组分,其粒级以泥为主,可包括一些细粉砂。杂基的成分中最常见的是高岭石、水云母、蒙脱石等黏土矿物,有时见有灰泥和云泥。颗粒相对较粗大的碎屑岩所包含的各种细粉砂级碎屑,如绢云母、绿泥石、石英、长石及隐晶结构的岩石碎屑等,也属于杂基范围。它们是悬浮载荷经卸载后形成的

堆积产物。

胶结物：胶结物是碎屑岩中以化学沉淀方式形成于粒间孔隙中的自生矿物。它们有的形成于沉积时期（同生期），但多数是成岩时期（后生期）的沉淀产物。碎屑岩中的胶结物成分主要为硅质、碳酸盐和铁质（赤铁矿、褐铁矿）。此外，还有很多自生矿物，如石膏、硬石膏、磷灰石、沸石、海绿石等，它们可以作为孤立的自生矿物存在，也可以作为碎屑岩的胶结物。

在此需要指出的是，颗粒、杂基和胶结物构成了整个岩石的固体格架，同时在岩石中还存在未被固体物质（不包括沥青质）充填的空间（孔隙或裂缝），这是石油（含沥青质）、天然气和地层水的赋存场所。

（2）陆源碎屑岩的结构

陆源碎屑岩的结构是指碎屑颗粒本身、填隙物的特点以及颗粒与填隙物间的关系的总称。

①碎屑颗粒的结构

碎屑颗粒的结构特征，一般包括粒度和形态两个方面。

粒度：碎屑颗粒的粒度（即大小）通常用颗粒的直径来计量，是碎屑颗粒最主要的结构特征。碎屑颗粒的大小直接决定着岩石的类型和性质，是碎屑岩分类命名的重要依据。依据碎屑颗粒的粒度可以将其简单划分为几个级别： $>2\text{mm}$ 为砾， $2\sim0.1\text{mm}$ 为砂， $0.1\sim0.01\text{mm}$ 为粉砂， $<0.01\text{mm}$ 为泥（黏土）。主要由对应级别颗粒组成的陆源碎屑分别被称为砾岩、砂岩、粉砂片和泥岩。

形态：包括圆度、球度两个方面。圆度是指碎屑颗粒的原始棱角被磨圆的程度，它是碎屑的重要结构特征之一。球度是一个定量参数，用它来度量一个颗粒近于球体的程度。颗粒的三个轴愈接近相等，其球度愈高；相反片状和柱状颗粒都具有很低的球度。此外，要注意将球度和圆度这两个概念区别开。由图 1-1-1 中可以看出，不同球度的颗粒可以属于同一圆度级别，而球度类似的颗粒又可表现出完全不同的圆度。

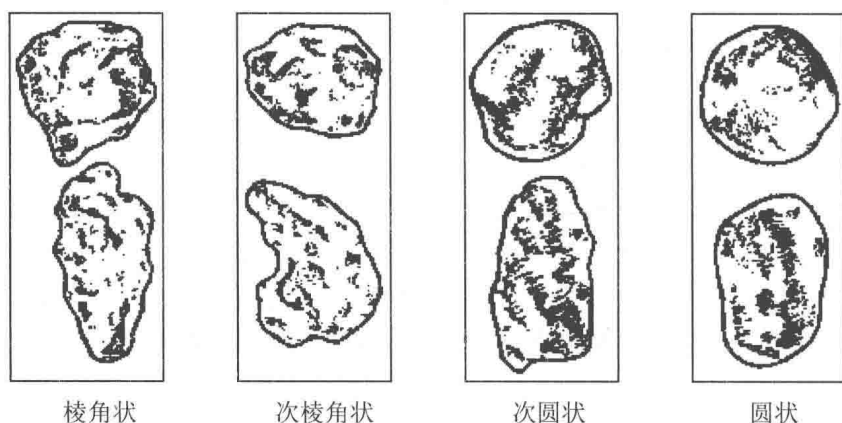
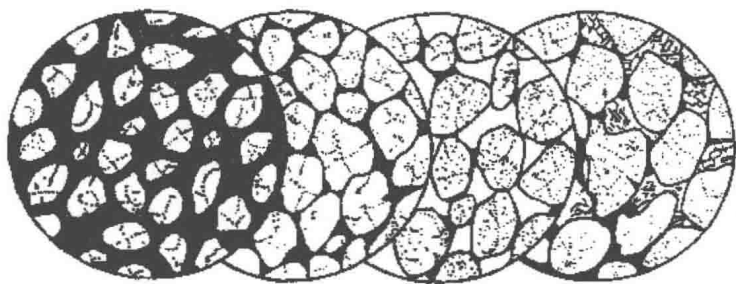


图 1-1-1 颗粒圆度的形状和分级（据鲍尔斯，同一方框的颗粒圆度相似但球度不同）

②胶结类型：在碎屑岩中，碎屑颗粒和填隙物间的关系称为胶结类型或支撑类型。它首先与碎屑颗粒和填隙物的相对含量有关，其次与颗粒间的接触关系有关。胶结类型主要有两种分类方法。第一类方法是按碎屑颗粒和杂基的相对含量可以分为杂基支撑和颗粒支撑两大类。杂基含量高时，岩石中的颗粒呈漂浮状态，彼此间不接触，称为杂基支撑。杂基含量少时，岩石中的颗粒彼此接触，杂基充填在颗粒之间，称为颗粒支撑。第二类方法

按颗粒和填隙物的相对含量和相互关系可以分为基底式胶结（或半基底式胶结）、孔隙式胶结、接触式胶结和充填胶结（图 1-1-2）。基底式胶结一般属于杂基支撑类型，孔隙式胶结、接触式胶结和充填胶结属于颗粒支撑类型。

- 基底式胶结：碎屑颗粒在杂基中大多彼此不相接触而呈漂浮状孤立地分布。
- 孔隙式胶结：大部分颗粒彼此直接接触，填隙物存在于颗粒的空隙中。
- 接触式胶结：胶结物只在颗粒接触处才出现。
- 充填胶结：孔隙胶结的胶结物被溶解，所造成的孔隙再次被次生胶结物充填。



(a) 基底式胶结 (b) 孔隙式胶结 (c) 接触式胶结 (d) 充填胶结

图 1-1-2 四种典型的胶结类型

(3) 陆源碎屑岩的主要类型——砂岩

陆源碎屑岩的主要类型有砂岩、砾岩、粉砂岩、黏土岩等，由于在油气地震勘探领域砂岩是重要的油气储集层，而且砂岩也常常是岩石物理学领域的主要研究对象，本节仅介绍砂岩的相关基础知识。

习惯上常常把粒径>2mm 的碎屑含量大于 50%的碎屑岩称为粗碎屑岩，砾岩和角砾岩合称粗碎屑岩。砂岩的分布远较砾岩广泛，在沉积岩中仅次于黏土岩而居第二位，约占沉积岩的 1/3。

①砂岩的分类

根据砂岩的三种砂级碎屑组分（石英、长石、岩屑）和黏土杂基的相对含量可以将砂岩进一步分为许多小类。首先按杂基含量将砂岩分为净砂岩（杂基含量<15%）和杂砂岩（杂基含量为 15%~50%）两大类。大类划定后，每一大类中的类型划分则要依据石英、长石、岩屑的相对含量进一步细分（见表 1-1-2）。

表 1-1-2 砂岩成分分类表

岩类名称	岩石名称	主要碎屑颗粒含量/%			备注
		石英	长石	岩屑	
石英（杂）砂岩	石英（杂）砂岩	>90	<10	<10	长石>岩屑 岩屑>长石
	长石质石英（杂）砂岩	75~90	5~25	<15	
	岩屑质石英（杂）砂岩	75~90	<15	5~25	
	岩屑质石英（杂）砂岩	50~75	<25	<25	
长石（杂）砂岩	长石（杂）砂岩	<75	>25	<25	长石>岩屑
	岩屑质长石（杂）砂岩	<65	25~75	10~50	
岩屑（杂）砂岩	岩屑（杂）砂岩	<75	<25	>25	岩屑>长石
	长石岩屑质（杂）砂岩	<65	10~50	25~75	

砂岩（或杂砂岩）基本类型的划分是根据主要的陆源碎屑组分的百分比含量，没有考虑次要矿物和特殊矿物，当砂岩中含有这些矿物时，可采用附加定名，如河绿石石英砂岩等。

②砂岩的主要类型

石英砂岩：石英砂岩的颜色大都为灰白色，有些略带浅红、浅黄、浅绿等，少数为较深色调。石英砂岩最突出的特征是石英碎屑占 90% 以上，含有少量长石和燧石等岩屑。胶结物大多为硅质，次为钙质、铁质及海绿石等。石英砂岩是高度成熟的砂岩，它是风化作用、分选作用和磨蚀作用持续较久和深化的终极产物。它的产出需要稳定的大地构造条件和砂质的多旋回沉积作用，主要产于海洋环境。

长石砂岩：包括长石砂岩和岩屑质长石砂岩。一般情况下，长石砂岩常因钾长石含量多而呈肉红色。长石砂岩主要由石英和长石组成，岩屑在长石砂岩中通常作为附属成分，含有大量的云母碎屑是长石砂岩的特征之一。重矿物含量一般比石英砂岩类高，可达 1% 以上，成分较复杂，既有稳定组分，如锆石、金红石、电气石、石榴子石和磁铁矿等，还常见稳定性差的矿物，如磷灰石和绿帘石。胶结物常为钙质，有时为铁质，硅质的较少。

岩屑砂岩类：包括岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩，一般呈浅灰色和灰绿色，灰黑色也常见。岩屑砂岩有丰富的岩屑，石英一般也是岩屑砂岩的主要成分，长石含量一般较少，碎屑云母常是值得注意的组分。岩屑砂岩常有钙质和硅质胶结物，当为硅质胶结时，碎屑石英可显次生加大现象，一般缺乏杂基物质。碎屑颗粒的分选性及磨圆度不好。岩屑砂岩分布也较广，约占全部砂岩的 1/5 到 1/4。

二、碳酸盐岩

碳酸盐岩是指主要由沉积的碳酸盐矿物（方解石、白云石等）组成的沉积岩，主要的岩石类型为石灰岩和白云岩。它们还经常和陆源碎屑及黏土组成各种过渡类型的岩石。碳酸盐岩是分布很广的一类沉积岩，约占沉积岩总量的 20%，在地壳中的分布仅次于泥质岩和砂岩。在我国，沉积岩覆盖面积占国土总面积的 75%，而碳酸盐岩约占沉积岩覆盖面积的 55%。南方的元古界、古生界及中生界的三叠系，北方的元古界及古生界，都是以碳酸盐岩为主。

碳酸盐岩中蕴藏有丰富的固体矿产资源，如铁、铝、锰、磷、硫、石膏及硬石膏、石盐、钾盐等层状固体矿床。碳酸盐岩又是重要的生油气岩石和储油气岩石，其中蕴藏着丰富的石油和天然气资源。

（1）碳酸盐岩的矿物成分

碳酸盐岩主要由碳酸盐矿物组成，还含有少量非碳酸盐自生矿物及陆源矿物。其矿物主要是方解石和白云石，还有少量菱镁矿、菱铁矿、菱锰矿等。此外，非碳酸盐自生矿物的含量虽少，但种类众多，如海绿石、黄铁矿、石膏、硬石膏、自生石英、自生长石等。碳酸盐岩所含的陆源矿物主要为石英、长石和黏土矿物。在碳酸盐岩中，黏土的含量可以很高，其中以含水云母为多，高岭石亦可见到，但很少有蒙脱石。

（2）碳酸盐岩的结构组分

碳酸盐岩的结构与岩石的成因有密切关系，它不仅是岩石分类命名的主要依据，而且是环境分析的重要标志。一般经过波浪和流水作用的搬运、沉积而成的碳酸盐岩，常常具有颗粒（粒屑）结构，即由颗粒、泥晶基质（或灰泥杂基）、亮晶胶结物和孔隙四种结构组分构成。由原地生长的生物构成岩石骨架的生物岩或礁灰岩，常具有生物骨架结构，即由造架的生物、粘结的生物与填隙的颗粒（或泥晶基质）及亮晶胶结物构成。由化学或生物化学作用

沉淀生成的石灰岩或白云岩，常具有泥晶或微晶结构，一般属于低能环境的沉积。

①颗粒组分

颗粒也叫粒屑、异化粒，有别于来自盆地外的陆源碎屑颗粒。泛指盆地内化学或生物化学成因的碳酸盐沉积物在波浪、潮汐等水流作用下就地或经短距离搬运而形成的一系列碳酸盐颗粒，或叫异化粒。

根据组成特征和成因，碳酸盐岩主要的颗粒组分有内碎屑、鲕粒、球粒和生物颗粒等。

内碎屑：指在沉积盆地内形成的碳酸盐碎屑。它可以是已经沉积的、弱固结或固结的碳酸盐沉积物，经波浪、潮汐等水流作用冲刷、破碎、搬运、磨蚀、再沉积而成。

鲕粒：是一种由核心和包壳组成的粒径小于 2mm 的球形或椭球形颗粒，外形很像鱼子，因而得名。其核心可以是陆源碎屑（石英、长石）、内碎屑或生物碳酸盐颗粒等。包壳是内化学沉淀形成的、同心状或放射状排列的隐晶-微晶碳酸盐矿物。

球粒：又称团粒，是由微晶碳酸盐矿物所组成的不具有内部构造的、表面光滑的球形或卵形颗粒，是低能环境的产物，粒径一般介于 0.03~0.1mm，少数可达 0.5~0.7mm。

生物颗粒：是大多数碳酸盐岩内常见的颗粒组成部分，包括破碎的生物化石碎块和微体（<2mm）化石，又称骨屑。

②泥晶基质

泥晶基质又称为灰泥和微晶灰泥，是盆地内形成的细小的碳酸盐泥屑，相当于砂岩的杂基。泥晶基质的可能成因与来源有多种：它可以直接由化学沉淀产生，也可以由波浪和流水对较大的碳酸盐颗粒机械磨蚀作用而形成，生物作用也能形成泥晶基质。

③亮晶胶结物

亮晶胶结物又叫淀晶胶结物，简称亮晶或淀晶，是充填于原始颗粒间起胶结作用的化学沉淀物质。但在手标本中，亮晶胶结物与泥晶基质很难区别，可笼统地称它们为“基质”。

④生物格架

主要是指原地生长的群体生物如珊瑚、苔藓、海绵、层孔虫等以其坚硬的钙质骨骼所形成的骨骼格架。

（3）碳酸盐岩的分类

目前对于碳酸盐岩的分类方法主要有成分分类、结构-成因分类等。

根据构成碳酸盐岩的主要矿物（方解石和白云石）的相对含量，可把碳酸盐岩划分为两大类：方解石含量大于 50%，属石灰岩类；白云石含量大于 50%，属白云岩类。碳酸盐岩的成分分类表见表 1-1-3。

表 1-1-3 碳酸盐岩成分分类（曾允孚等，1980）

岩石类型		矿物成分含量/%	
		方解石	白云岩
石灰岩类	石灰岩	90~100	0~10
	含白云质灰岩	75~90	10~25
	白云质灰岩	50~75	25~50
白云岩类	灰质白云岩	25~50	50~75
	含灰质白云岩	10~25	75~90
	白云岩	0~10	90~100

由于含有不同程度的碎屑物质和黏土物质，碳酸盐岩与碎屑岩和黏土岩之间还有一系列过渡类型，如含泥质灰岩、含泥质白云岩、泥灰岩、砂质石灰岩、粉砂质石灰岩、砂质白云岩、粉砂质白云岩等。

三、油页岩

油页岩又称油母页岩，是指主要由藻类及一部分低等生物的遗体经腐泥化作用和煤化作用形成的一种高灰分、低变质的腐泥煤，其矿物质或灰分的含量很高（有时可达 70% 以上）。

油页岩含有一定的沥青物质或油母物质，通过加热（干馏）可从中提取原油。因此，油页岩也是一种石油资源。

油页岩的层状层理发育，甚至可呈极薄的纸状层理。颜色多样，有暗褐、浅黄、黄褐、褐黑、灰黑、深绿、黑色等。一般情况，含油率越高，颜色越暗，风化后颜色常变浅。其相对密度为 1.4~2.3，比一般的页岩轻；干燥的油页岩相对密度更小。油页岩大都坚韧不易破碎，常具有弹性；含油率高者，用小刀刮起的薄片可发生卷曲。含油率为 4%~20% 不等，高的可达 30%。此外，油页岩具有可燃性，含油率高的用火柴即可点燃。

油页岩的生成环境主要为水流闭塞的湖泊或海湾环境。正常海洋环境生成的油页岩不常见，苏联伏尔加地区含侏罗纪菊石的油页岩是海洋环境生成的。我国东部中生代湖相沉积中的油页岩与暗色泥岩共生，属深水成因，构成良好的烃源岩。

1.1.3 油气的储集岩

一、烃源岩

烃源岩又称为生油母岩，同理对于天然气又有气源岩、生气母岩之称。张厚福等（1989）定义烃源岩为能够生成石油和天然气的岩石。根据生成烃类的性质的不同，可将烃源岩分别称为生油岩、生气岩或生油气岩。烃源岩是油气生成的基础，具备良好的烃源岩是沉积盆地形成油气聚集的前提和必备条件。

烃源岩可分为黏土岩类和碳酸盐岩类两大类。

（1）黏土类烃源岩

黏土岩类烃源岩主要包括泥岩、页岩、黏土等细粒碎屑沉积物，往往是海相的浅海、海湾、泻湖、三角洲环境和陆相的深湖、半深湖环境的产物，在这样的地理环境中水体安静，阳光充足，温度适宜，气候湿润，生物大量繁殖，水体深度合适、乏氧，有利于生物死亡后的保存。在这些环境中形成的黏土岩富含有机质和生物化石，颜色多为暗色，如黑色、灰黑色、深灰色、灰绿色等，常含有黄铁矿、磷铁矿等指示还原环境的指相矿物，其地面露头或岩心中常见石油沥青类显示。我国主要陆相含油气盆地烃源岩特征见表 1-1-4。

表 1-1-4 我国主要陆相含油气盆地烃源岩特征

盆地	层位	烃源岩特征				
		颜色	岩性	自生矿物	沉积环境	
					沉积相	古气候
松辽	嫩江组	灰绿-黑色	泥岩为主	含大量的黄铁矿	半深湖	近海潮湿
	青口山组	深灰-灰黑色	泥岩为主	含大量的黄铁矿	深-半深湖	
四川	大安寨组	灰绿-灰黑色	泥岩、介壳灰岩	含大量的黄铁矿	深-半深湖	近海干旱
渤海湾	沙河街组	灰绿色、深灰色	泥岩、油页岩为主	含黄铁矿	半深湖	近海潮湿-半干旱
柴达木	下干柴沟组	灰色、深灰色	泥岩、钙质泥岩为主	——	深-半深湖	内陆干旱
准噶尔	上二叠统	黑色	页岩为主	含分散黄铁矿	半深湖	近海半潮湿-半干旱

(2) 碳酸盐岩类烃源岩

包括生物灰岩、介壳灰岩、细晶-隐晶质灰岩、泥灰岩及白云岩等。这些生油层发育在浅海、泻湖、海湾和深水湖泊环境，多呈黑色、深灰色、褐灰色及灰色，颗粒小，以灰泥为主，多成厚层块状，水平层理和波状层理发育，含黄铁矿和生物化石。我国四川盆地丰富的天然气即生自二叠系和三叠系灰岩，华北古生界及华南都发育有良好的碳酸盐岩类烃源岩。

二、储集层

油气勘探开发实践证实，地下并不存在什么“油湖”、“油海”，油气是储集在具有孔隙和裂缝的岩层中的，就像水储存在海绵里一样。这些能够储集和渗滤油气的岩层称为油气储集层，简称储集层或储层。

按照基本岩石类型分类，储集层可以分为碎屑岩储集层、碳酸盐岩储集层和其他岩类储集层。

(1) 碎屑岩储集层

碎屑岩储集层主要包括各种砂岩、砾岩、粉砂岩等。它们是油气田的主要储集层类型，油气储量约占全世界总储量的60%。我国的大庆、胜利、大港、克拉玛依以及塔里木油田的储集层多以碎屑岩储层为主。

储集空间：碎屑岩储集层的储集空间根据成因可分为原生孔隙和次生孔隙。在沉积和成岩过程中形成的孔隙叫原生孔隙，如碎屑颗粒之间的粒间孔隙、成岩裂缝等。粒间孔隙是碎屑岩储集层的主要储集空间类型。在碎屑岩成岩后，由于溶解、交代、重结晶、风化、构造运动等作用所形成的孔隙叫次生孔隙。

影响因素：影响碎屑岩储集层储集物性的因素主要有沉积条件和成岩作用两大类，其中沉积条件的影响主要体现在碎屑颗粒的组成成分、粒度、分选、排列方式、圆球度等，成岩作用主要体现在机械压实作用、化学胶结作用及自生矿物的大量发育等。

成因类型及分布：世界各地的碎屑岩储集层以砂岩为主，其次为砾岩，它们可以在许多环境中发育，形成各种类型的储集体。概括起来，海相的碎屑岩储集体主要有滨海砂体、浅海砂体；陆相的有河流、三角洲、扇三角洲、近岸水下扇、湖底扇、滩坝和冲积扇等砂体。由于沉积条件的差异，不同盆地所发育的砂体在形态、规模、矿物成分、结构、埋深等方面都存在一定的差异，储集物性差异往往也较大。

(2) 碳酸盐岩储集层

碳酸盐岩储集层包括石灰岩、白石岩、白云质灰岩、生物碎屑灰岩和鲕粒灰岩等，几乎所有的碳酸盐岩都可以成为油气储集层。目前世界上已发现的油气储量的40%左右来自碳酸盐岩储集层。碳酸盐岩储集层构成的油气田常常储量大、产量高，容易形成大型油气田，如我国的元坝气田。

储集空间：通常分为孔隙、溶洞和裂缝三类。孔隙是指岩石结构组分之间的空隙，与碎屑岩中的孔隙相似。溶洞是指由于溶蚀作用扩大了孔隙，二者界限不甚明确，有人将它们合称为孔洞。它们是油气聚集的空间，也是渗流的重要通道。裂缝是指不受岩石结构限制的狭长状空隙。碳酸盐岩由于物性较脆，易产生裂缝，因此在碳酸盐岩地层中裂缝发育相当普遍。裂缝有极大的长度和宽度，非常适合流体渗滤，对改善储集层的渗透性十分重要。

孔隙和裂缝发育的控制因素：碳酸盐岩孔隙和裂缝是主要的储集空间，从根本上决定