

储层地震地层学

刘震 编著

地质出版社

京)
.2

登录号	125928
分类号	P618.130.2
种次号	159

储层地震地层学

刘震 编著



石油0121896

地质出版社

· 北京 ·

内 容 提 要

本书系统地阐述了储层地震地层学关于储层地质基础、储集相带判别、储层解释中的地震处理方法、薄层岩性-物性-含烃性定量分析、预探井钻前储层预测五个方面的基本原理和应用方法,为储层地震地层学在油气勘探和开发中的应用提供了有效的理论基础。

本书对从事储层描述、储层横向预测与油气勘探的地质及地球物理的科研、教学和生产人员有重要参考价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

储层地震地层学/刘震编著. -北京:地质出版社, 1997. 12
ISBN 7-116-02485-9

I. 储… II. 刘… III. 储集层-地震地层学 N. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 24093 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:王休中 林建

责任校对:田建茹

*

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092 1/16 印张: 16.5 字数: 389000

1997 年 12 月北京第一版·1997 年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—2100 册 定价: 30.00 元

ISBN 7-116-02485-9

P·1844

前 言

应用地震资料研究储层应该是最近 20 年来地震勘探工作围绕的中心目标之一,差不多所有的地震采集和处理研究都集中于提高资料的分辨率、信噪比和振幅保真度三个方面。但“三高”的要求主要不是针对区域性宏观目标勘探,而是为了让地震剖面更加清晰准确,以便更好地识别和预测小而薄的油气储层或油气藏。

尽管解释人员开始运用地震资料分析地下地层岩性(这与储层研究有关)的时代可以追溯到 60 年代,但作为一门独立的地震地层学分支,储层地震地层学的孕育期是在 70 年代,基本成型是在 80 年代中期。时至今日,储层地震地层学不仅能够钻前对储层的几何形态、岩相类型、储集物性、孔隙流体压力和孔隙含油气程度作出预测,为钻探提供直接的依据;而且在与油藏工程结合后,能够监测开发过程中增产措施的实施,以便更经济地开发油气田。

作者从 1987 年开始从事储层地震地层学的研究,曾先后参加了国家自然科学基金项目“地震地层学方法研究”、“七五”部级重点科技攻关项目中的课题“渤海湾地区下第三系储层地震地层学研究”。期间,在张万选教授等导师的指导下,完成了题为“辽西凹陷下第三系储层地震地层学研究”的博士论文。1990 年毕业留校任教以来,继续承担地震储层研究工作,主要开展地震相解释专家系统和地震岩性模式识别等人工智能化解释方法,并探讨了预探井钻前储层预测技术。

在十年的研究工作期间,作者注意到这样一个现象:虽然在 80 年代中期储层地震地层学就在国外被提出来,但后来一直未见系统性的论著;国内虽然有一大批从事该方面研究的专家历经“七五”和“八五”科技攻关,也已取得地震储层研究的许多宝贵成果,而且各油田目前对地震储层预测日益重视,但是,从地质解释的角度上看,国内还没有对储层地震地层学从地质基础、资料获取到解释原理和预测方法作系统的论述。因此,几年前作者就产生了编著一本《储层地震地层学》专著的想法,但因教学科研事务繁忙,一直未能如愿。今天,作者终于实现这一心愿,完成了本书的编写工作。

本书共分五篇十五章。第一篇为储层地质基础,包括储层主要物理特征、储集相类型和储层成岩作用共三章,内容基本上是在总结前人的认识和成果后编写而成的;第二篇为区域储层分析,包括地震相解释专家系统、地震速度-岩性分析模型和差异层间速度分析共三章;第三篇是资料预备,包括地震分辨率的讨论和面向储层解释的地震资料处理共两章;第四篇是薄层定量分析,包括地震薄层厚度分析、地震物性分析、地震地层压力分析和储层油气地震检测共四章;第五篇为预探井钻前储层预测,包括道积分和地震岩性模式识别,共两章。

本书既包含了对前人成果和认识的总结,又汇总了作者及其科研组全体成员的实践成果。其中,导师张万选和张厚福教授长期指导作者从事该领域的研究,同时,曾洪流、高先志、邓祖佑、殷积峰、戴建春、曾宪斌、邵新军等同志的研究工作为本书提供了有关资

料。

另外，作者在天津塘沽渤海石油公司计算中心先后长达五年的储层地震地层学研究期间，得到了计算中心主任刘玉班、陈继松、刘道安和王振华等高级工程师的热情帮助，资料分析室主任王金元高级工程师和欧寿权工程师在地震资料处理方面给予大力支持。由于他们的帮助和支持，使我顺利地完成了博士学位论文，而该论文又成为本书的核心内容。在完成本书写作之时，特向他们表示诚挚的谢意。

但愿本书的出版，对于从事储层描述、储层横向预测与油气勘探的同事们有所裨益。但由于作者水平和经验所限，书中难免有不妥之处，在此恳切欢迎读者对本书中的谬误与不足，给予批评指正。

石油大学（北京）地球科学系

刘震

1997年3月15日于北京

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 基本概念	(1)
第二节 储层地震地层学的形成过程	(4)

第一篇 储层地质基础

第二章 储集层主要物理性质	(7)
第一节 孔隙度及其影响因素	(7)
第二节 渗透率及其影响因素	(11)
第三节 流体饱和度	(19)
第四节 毛细管压力	(21)
第三章 储集相类型及特征	(24)
第一节 冲积扇砂砾岩体	(24)
第二节 河流砂体	(27)
第三节 滨岸砂体	(34)
第四节 海陆过渡带三角洲砂体	(39)
第五节 海底扇砂体	(44)
第六节 湖泊砂体	(46)
第七节 海相碳酸盐岩储集相	(51)
第四章 储层成岩作用	(54)
第一节 碎屑岩储层成岩作用	(54)
第二节 碳酸盐岩成岩作用	(64)

第二篇 储集相地震识别

第五章 地震相解释专家系统	(68)
第一节 储集体的主要地震相类型	(69)
第二节 陆相断陷盆地地震相模式	(75)
第三节 地震相解释与专家系统的关系	(77)
第四节 地震相解释的基本准则	(78)
第五节 陆相断陷盆地地震相解释专家系统 SFIES 的结构及功能	(79)
第六节 应用实例	(81)
第六章 地震速度-岩性预测模型	(83)
第一节 速度与岩性关系的主要特性	(83)
第二节 砂泥岩压实模型	(84)
第三节 地震层速度转换模型及其误差	(89)
第四节 速度校正模型	(90)
第五节 岩性指数转换模型及其误差校正	(93)
第六节 实际应用	(94)
第七章 地震差异层间速度分析	(105)
第一节 差异层间速度分析法	(105)

第二节	改进型 DIVA	(106)
第三节	双临界 DIVA	(114)

第三篇 地震资料预备

第八章	地震分辨率	(118)
第一节	地震垂向分辨率	(118)
第二节	横向分辨率	(127)
第九章	储层解释中的地震资料处理	(132)
第一节	精细处理	(132)
第二节	子波处理	(140)
第三节	保持振幅处理	(151)
第四节	波阻抗反演	(153)

第四篇 薄层岩性-物性-含烃性分析

第十章	地震薄层厚度分析	(159)
第一节	薄层分析的理论基础——褶积模型	(159)
第二节	薄层的地震反射特征	(162)
第三节	调谐原理及其应用	(166)
第四节	薄互层地震厚度分析	(174)
第五节	薄层地震频谱特征及其应用	(182)
第六节	“反射波特征点法”简介	(186)
第十一章	储层孔隙度地震预测	(192)
第一节	基本岩石物性方程	(192)
第二节	时间平均方程及扩展时间平均方程的应用	(198)
第十二章	地震地层压力分析	(206)
第一节	根据地层速度预测地层压力的主要模型	(206)
第二节	趋势地层压力预测模型	(210)
第三节	精细地层压力计算模型	(214)
第十三章	储层油气地震检测	(218)
第一节	亮点技术	(218)
第二节	地层波速和频谱特性在油气预测中的应用	(224)
第三节	AVO 技术及其应用	(228)

第五篇 预探井钻前储层预测

第十四章	地震道积分在预探井钻前储层预测中的应用	(239)
第一节	基本原理	(239)
第二节	道积分的应用	(240)
第十五章	地震岩性模式识别在预探井钻前储层预测中的应用	(247)
第一节	地震岩性模式识别的特点	(247)
第二节	地震岩性模式识别过程	(248)
第三节	SLPR 应用效果分析	(252)
参考文献	(255)

第一章 概 论

第一节 基本概念

一、定义

储层地震地层学是地震地层学的一个分支，它是储层地质学与地球物理学相结合而形成的一门新型边缘学科。

储层地震地层学是在层序地层学确定的年代地层框架内，综合运用岩心、录井、测井、地震和实验室测试等资料，描述和确定储集层发育的储集相带特征和类型、储集体（或层）的分布范围和几何形态、储层内部物性变化、储层孔隙流体压力分布以及储层含油气特征等储层参数，在钻前对储集层的类型和质量作出评价和预测。

二、渊源与定位

地震地层学在过去的 20 年间，已经获得了举世瞩目的发展。目前，业已形成了影响全球油气勘探和开发的一个庞大的地震地层学-层序地层学体系。

1. 70 年代的学说——地震地层学

1977 年，美国 AAPG 第 26 专集全面推出了以 Exxon 公司生产研究组中 Vail、Sangre、Mitchum 等学者提出的全新的地震地层学原理和方法。该专集《地震地层学》（在油气勘探中的应用）可视为整个地震地层学-层序地层学领域的奠基石。

该专集指出，“地震地层学是发展最快的一个地学分支”，“基本上是一种利用地震资料进行地质解释的地质方法”，并说明地震地层学主要是进行三项研究：①地震层序分析；②地震相分析；③海平面相对变化分析。其最根本任务是恢复沉积环境。

专集首次完整地定义了沉积层序和地震相，使地层对比从岩石地层对比和生物地层对比时代进入到年代地层对比阶段。而且更重要的是，当时就已经认识到全球周期性海平面升降对海相沉积层序中的地层和岩相起控制作用。

在地层单元划分方面，首次提出了以不整合为其边界的层序划分原则，强调了地震剖面上主要的地震反射（指能进行区域性追踪的地震反射波）具有等时意义，指出了岩石地层单位存在穿时现象。

在地震相分析方面，提出了六种基本相参数和每一种参数的模式及其地质成因，为地震相向沉积相转换奠定了基础。

在全球海平面变化方面，划分了三级海平面升降周期，确定了海平面相对变化的主要标志。

上述划时代的概念和方法不但促进了 70 年代末期至今的全球油气勘探，而且为 80 年代末期层序地层学的诞生打下了坚实的基础。

2. 80 年代的学说

(1) 学说之一——储层地震地层学

1984年,美国 Geo Quest 公司的 Macurda 等和 Lindsey 等分别推出了各自的专著,一本是《应用地震地层学》,另一本是《储层参数的地震测定方法》。在这两本书中,比较系统地论述了薄储层厚度定量估算原理和方法,讨论了地震孔隙度估算的基本岩石物性方程,以及储层预测中所需的部分地震资料处理方法。当时,在国际上掀起了一股以薄层或小目标为主的地震地层学研究热潮。很多人称这种地震地层学为“局部地震地层学”,而把70年代 Vail 等创立的经典地震地层学称为“区域地震地层学”,也有一些学者把“局部地震地层学”称为“微地震地层学”。由于以薄层为主的地震地层学研究主要集中在储集层方面,故更多地被称之为“储层地震地层学”(Reservoir Seismic Stratigraphy)。

当时一般的理解是,区域地震地层学主要是针对盆地或盆地内某区带中那些较大范围的研究目标;其厚度一般是几十米—几百米厚;在地震剖面上表现为一组同相轴组成的反射波组;研究内容是以地震层序划分和地震相分析为主;研究目的主要是恢复沉积环境(表1—1)。而储层地震地层学则不同,它主要是针对盆地某区块或某岩相带中那些范围较局限的目标(一般是区域地震地层学研究中确定的有利储集相带);厚度比较小,一般在几米—十几米范围内;在地震剖面上主要表现为一个反射同相轴或极少数同相轴组成的薄的反射波组;研究内容是储层的厚度分布、储层内部物性分布和孔隙流体性质变化;研究目的主要是提取储层参数,确定最有利的油气储集部位。

表 1—1 地震地层学-层序地层学体系的分工

学科分支	应用地震信息类型	主要任务
区域地震地层学	<ol style="list-style-type: none"> 1. 传播时间 2. 地震相参数,包括内部反射结构、几何外形、频率、振幅、连续性和层速度等 3. 叠加速度谱 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 完成等时地层对比 2. 地震相转沉积相
储层地震地层学	<ol style="list-style-type: none"> 1. 传播时间 2. 叠加速度谱 3. 反射波振幅 4. 频谱特征 5. 合成声阻抗 6. AVO 剖面 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 确定储集相类型 2. 确定储层几何形态和厚度变化 3. 确定储层孔隙度分布 4. 估算孔隙流体压力 5. 检测孔隙流体性质
层序地层学	<ol style="list-style-type: none"> 1. 传播时间 2. 叠加速度谱 3. 地震相参数 4. 合成声阻抗 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立年代地层框架 2. 确定体系域类型及演化模式 3. 划分准层序及准层序组 4. 恢复沉积相 5. 分析层序及体系域的主要成因

储层地震地层学主要是用地震资料解决薄层条件下岩石的岩性、物性和含油气性问题。人们后来吃惊地发现,实际上在 AAPG 第 26 专集中已经发表了多篇储层地震地层学方面的论文。如 Sheriff “关于地震反射的分辨率及由其解释出的地质细节的限制”;在薄层定量解释方面有: Neidell 等的“地层模拟和解释——地球物理原理和技术”、Meckel 和 Nath 的

“地层模拟与解释的地质条件”、Schramm 等的“实际的地层模拟和解释”，当时把薄层分析称为“地层模拟和解释”；在岩石物性分析方面，Gregory 论述了“对地震解释有重要作用的岩石物性”。由于沉积层序和地震相概念以及海平面变化规律的轰动效应，在 70 年代末人们还没有注意到储层地震地层学的悄悄来临。进入 80 年代后，随着储层表征和储层模拟的发展，以及地震技术的进步，储层地震地层学轮廓逐渐清晰，最终形成了一个专门的地震地层学分支。

(2) 学说之二——层序地层学

1989 年，在美国 AAPG 等 74 届年会上，Exxon 公司的 Sangree 和 Vail 与他们的同事 Wagoner、Mitchum、Posamentier、Haq 等推出了《应用层序地层学》一书，全面系统地阐述了自 1977 年以来在层序研究方面取得的最新成果，使地震地层学研究发展到一个新的阶段。

层序地层学认为沉积层序的发育是受全球海平面变化控制，沉积地层的几何形态和岩性岩相受到全球海平面变化速率、构造沉降速率、沉积物供应速率和气候四大主控变量的控制。

层序地层学的任务是利用露头、钻井和地震等资料对地层进行综合解释，确定地层发育的年代地层框架，并在该年代地层框架内对岩相组合作出分析。

层序地层学提出了沉积体系域、可容沉积空间、密集段、准层序和准层序组等一系列新概念，确定了层序、体系域和准层序三级等时地层单元及其各自与海平面变化的对应关系。完善了层序的成因、层序的等时性和旋回性分析。

因此，层序地层学更加肯定了全球海平面变化对层序分布及其岩相变化的控制，并提出了被动大陆边缘沉积体系域动态演化模式，从而科学地建立了全球海平面变化控制沉积层序和沉积体系域演化的理论模式，确立了层序地层学在现代地学领域内的重要地位。

从根本上讲，层序地层学主要是研究区域性地层对比和沉积体系域分布模式，属于更加宏观的研究领域。目前许多人用层序地层学来研究储层分布，实际上只是研究储层发育的层位特征和储集相带特征。如果用层序地层学来预测油气生储盖组合，可能会更加有效，这是因为层序及其内部体系域的旋回性发育特点非常适合于对地层和岩性组合作出预测。

目前，几乎所有的地质学分支都与层序地层学发生关系。全世界在海相和陆相盆地中加快了对层序地层学的研究。但无论怎样讲，层序地层学的确是从地震地层学中演化出来的一个新的分支，或者说层序地层学是地震地层学发展最新阶段的代表之一（图 1—1）。而储层地震地层学则是另一个重要的分支。

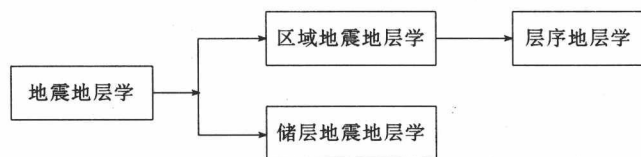


图 1—1 地震地层学-层序地层学领域的体系结构

第二节 储层地震地层学的形成过程

运用地震资料进行储层分析，实际上是一项很早就已经应用的解释技术。解释人员凭借经验指出地震剖面上的反射特征在横向或纵向的细微变化（振幅、频率、相位等变化）与地下某些特定地质现象有关。通过与钻井资料控制的已知地质资料的对比，在一个新的地区或区块上，解释人员有时可以推断地下将会出现何种地层和岩石类型。但是，储层地震地层学学科的形成却经历了一个漫长的过程。

一、早期速度-岩性分析

从地震资料推导岩性信息的第一次尝试，是根据正常时差分析即动校正导出的叠加速度所换算的层速度来预测砂-泥岩地层中的岩性。库克和泰纳（Cook 和 Taner, 1969）发现速度谱中包含有相当丰富的岩性和地层变化的信息，并且利用速度谱资料识别出了泥岩层段和砂岩体。甚至在当时就已经考虑并解决了地层倾角在层速度计算中的影响，而层速度的获得主要应归功于迪克斯（Dix, 1955）的著名公式——均方根速度与层速度的关系式。后来很多地区都曾用这种方法估算过砂岩百分比，以帮助解释沉积环境，确定有利储集相带。

二、亮点技术

在 70 年代早期，亮点技术作为第一个直接检测地下油气存在的技术进入石油界（Craft, 1973）。强振幅、极性反转、平点、时间滞后和阴影带等特征成为勘探工作者发现许多新气田的依据。这项技术当时主要应用在墨西哥湾盆地。由此引发出的各种各样的碳氢检测技术至今仍然方兴未艾。

三、岩石物性研究

在 70 年代，加强了实验室条件下岩石各种弹性参数与物性关系的研究。夏德纳和格雷戈里等（Gardner, Gregory, et al., 1974）指出：有很多因素能影响地震反射系数，而速度和密度取决于岩石骨架的矿物成分和粒状特性，取决于胶结物、孔隙度、流体成分和围压，并特别讨论了岩石微裂隙导致压力对速度的影响作用。多米尼克（Domenico, 1977）研究了压应力和孔隙流体特性对非固结砂岩储层的弹性特征的影响，以及对纵波和横波速度的影响规律。这些工作，为后来地震物性分析打下了基础。

四、薄层调谐原理

地震反射波振幅分析的一个重要方面是薄层的调谐现象。雷克（Ricker, 1940, 1953）和威德斯（Widess, 1973）都认识到两个极性相反的脉冲相加时，随着它们间隔的变化，会出现一种“调谐现象”，即复合波振幅达到极大值。威德斯并把薄层定义为小于 $1/8$ 波长的厚度范围。林赛（Lindsey, 1975）、麦克尔和纳斯（Meckel, Nath, 1977）以及尼德尔等（Neidell, et al., 1979）讨论了薄层响应的重要性，作出了真厚度-视厚度关系曲线和真厚度-反射振幅关系曲线，并指出：在时差相当于 $1/4$ 主波长内的两个极性相反的反射波叠加后形成的复合波形不变，但其振幅大小却包含了与两波时差大小有关的信息。因此，若对地层波阻抗特性作出估算或假定后，用地震振幅就可以估算出薄层的厚度。

五、地震反演

第二个在地球物理勘探界引起震动的是地震记录反演技术。但在开展准确的地震反演

前，发展了与标准的最小相位反褶积技术不同的子波处理。地震记录反演就是将子波处理后的零相位地震记录——近似的反射系数序列转换成波阻抗曲线。林赛斯(Lindseth, 1972, 1975)和拉沃杰恩等(Lavergne, et al., 1977)根据反射率的估计值一维地恢复出滤去噪声的波阻抗曲线，并指明：由于地震脉冲频率特性中的高通限制，不能得到速度在地层中变化的低的空间频率成分。

六、振幅随炮检距变化

进入 80 年代后，地震反射振幅与炮检距关系成为勘探家讨论的一个重要课题。这项技术又称之为 AVO 技术 (Amplitude Versus Offset)。该方法是在 CDP 道集上分析振幅随炮检距的变化，它的应用开创了估计弹性参数的实用方法。实际上该方法的原理早在 40、50 年代就已经问世 (Muskat 和 Mere, 1940; Koefoed, 1955)，只是由于当时的技术条件所限，未能实际应用。直到 80 年代以后，随着现代化采集和处理技术的进步，才对地震反射振幅随炮检距的变化进行了专门研究 (Ostrander, 1982; Graul, et al., 1984; 等)，使这个花了昂贵代价采集到的，而又被常规处理所忽视和丢掉的重要信息源得以发挥作用。这一技术的开发，对于识别“亮点”、判别气/油或气/水界面、反演弹性参数、估计岩性等研究提供了有力的手段。

由于上述六大方面的进展，到 80 年代中期，储层地震地层学逐渐成型。它有别于传统的区域地震地层学和最新的层序地层学，成为地震地层学-层序地层学领域中的一个重要分支。

第一篇 储层地质基础

凡是能够储存和渗滤流体的岩层，统称为储集层，简称储层。储层之所以能够储集流体，是由于具备了两个基本特性——孔隙性和渗透性。孔隙性的好坏直接决定岩层储存流体的数量，而渗透性的好坏则控制储集层内所含流体的产能。严格地讲，地壳上各类岩石都具有大小不等的孔隙和渗透性能，绝对致密无缝的岩石是很少的。不论什么岩石，只要具备了一定的孔隙性和渗透性就可以作为油气储层。油气储层的含义只强调了具备储存油气和允许油气渗滤的能力，但并不意味着其中一定储存了油气。如果在储集层中含有油气，则可将该储集层称为含油气层。已经开采的含油气层称为生产层或产层。

目前已经发现的储集层有碎屑岩储层、碳酸盐岩储层、火成岩储层、变质岩储层和泥质岩储层，显然地壳上三大岩类都可以成为储集层。然而，分布最广、最重要的储集层是各类砂岩、砾岩、石灰岩、白云岩和礁灰岩。也就是说，绝大部分储集层属于沉积岩。一般把沉积岩类储层作为常规储层，而把火成岩和变质岩及其它岩类储层作为非常规储层。

沉积储层的形成和分布及其演化严格地受沉积盆地地质演化过程的控制。物源区风化剥蚀产物在盆地中最终形成储集层，通常要经历较长的地质演变时期，所产生的储集层的特征主要受沉积条件和沉积后成岩作用的影响。另外，盆地区域应力场的作用也能够改变储集层的性能。总之，储层的发育是地质作用的结果。

第二章 储集层主要物理性质

沉积岩要具有储存和渗滤油气的能力，必需在其颗粒之间存在石油和天然气聚集的空穴或间隙，而且这些空穴或间隙要有一定程度的连通。这两个条件就是储层的孔隙性和渗透性。同时，由于储集层是由固体骨架（如矿物颗粒、岩屑颗粒、生物碎片、胶结物等）和孔隙流体（如油、气、水）两种介质组成，储层固体骨架和孔隙流体的成分和物理性质就必然影响储层的整体物理性质。

第一节 孔隙度及其影响因素

一、孔隙度的概念

岩石中未被碎屑物质或填隙物充填的空间与岩石总体积之比，称为岩石的绝对孔隙度或总孔隙度。在石油工业中，通常是把“岩石中能够容纳流体的那一部分孔隙的体积，称为岩石的孔隙体积”（Musket, 1949）。显然，能够容纳流体的孔隙需要具有相互连通性，即流体能由一个孔隙运移到另一个孔隙。因此，又将相互连通的孔隙体积与岩石总体积之比称为岩石的有效孔隙度或连通孔隙度。

二、孔隙度的表示方法

1. 总孔隙度（绝对孔隙度）

总孔隙度等于岩样中所有孔隙空间体积之和与该岩样总体积之比。可用下式表示：

$$\varphi_t = \frac{\sum V_p}{V_r} \times 100\%$$

式中： φ_t ——总孔隙度，%；

$\sum V_p$ ——岩样中所有孔隙体积之和；

V_r ——岩样总体积。

储集层的总孔隙度越大，表明岩石中孔隙空间越大。但是由于岩石中不同大小和不同连通性的孔隙对流体的储存和流动所起的作用不甚相同，因此，总孔隙度并不能确切表达岩石储存油气的能力。实践证明，只有那些相互连通的孔隙才具有实际意义，而且允许油气在其中渗滤，即油气进入储层——油气运移并成藏；而后油气离开储层——油气藏开发。

2. 有效孔隙度（连通孔隙度）

有效孔隙度等于岩样中互相连通并能一定压差下允许流体在其中流动的孔隙总体积（即有效孔隙体积）与岩石总体积之比。可用下式表示：

$$\varphi_e = \frac{\sum V_e}{V_r} \times 100\%$$

式中： φ_e ——有效孔隙度，%；

$\sum v_e$ ——有效孔隙体积；

V_r ——岩样总体积。

显然，同一岩样的有效孔隙度小于其总孔隙度。在油气勘探和开发中，一般是使用岩石的有效孔隙度。

三、孔隙的尺度分类

根据岩石中孔隙大小及其对流体作用的差别，可将孔隙划分为三种类型：

1. 超毛细管孔隙

管形孔隙直径 $>0.5\text{mm}$ ($>500\mu\text{m}$)，裂缝宽度 $>0.25\text{mm}$ ($>250\mu\text{m}$)。在自然条件下，流体可以在其中自由流动，服从静水力学的一般规律。岩石中一些大的裂缝、溶洞及未胶结或胶结疏松的砂岩孔隙大部分属于此种类型。

2. 毛细管孔隙

管形孔隙直径介于 $0.5\sim 0.0002\text{mm}$ ($500\sim 0.2\mu\text{m}$) 之间，裂缝宽度介于 $0.25\sim 0.0001\text{mm}$ ($250\sim 0.1\mu\text{m}$) 之间。流体在这种孔隙中，由于受毛细管力的作用，已不能在其中自由流动，只有在外力大于毛细管阻力的情况下，流体才能在其中流动。微裂缝和一般砂岩中的孔隙多属于这种类型。

3. 微毛细管孔隙

管形孔隙直径 $<0.0002\text{mm}$ ($<0.2\mu\text{m}$)，裂缝宽度 $<0.0001\text{mm}$ ($<0.1\mu\text{m}$)。在这种孔隙中，由于流体与周围介质分子之间的巨大引力，在通常温度和压力条件下，流体在其中不能流动。增加温度和压力，也只能引起流体呈分子或分子团状态扩散。粘土和致密页岩中的孔隙即属此类型。

储集层的有效孔隙度一般在 $5\%\sim 30\%$ 之间，最常见者为 $10\%\sim 20\%$ 。因此，根据有效孔隙度的大小可以将孔隙度分为5种类型：

- (1) 特高孔隙度： $\varphi \geq 30\%$ ；
- (2) 高孔隙度： $25\% \leq \varphi < 30\%$ ；
- (3) 中孔隙度： $15\% \leq \varphi < 25\%$ ；
- (4) 低孔隙度： $10\% \leq \varphi < 15\%$ ；
- (5) 特低孔隙度： $\varphi < 10\%$ 。

四、孔隙度的一般影响因素

1. 碎屑岩储层孔隙度

决定砂岩孔隙度的主要因素是矿物成分、碎屑颗粒大小、分选程度、磨圆程度、胶结程度、压实程度、溶蚀作用和构造裂缝的改造程度。

(1) 矿物成分 砂岩孔隙度对岩石组成的依赖十分明显。经验研究和实验研究均证实，碎屑成分影响砂岩的机械和化学性质，这些性质又在砂岩演化的沉积期后影响其孔隙度(图2—1)。Scherer (1987) 用碎屑石英的丰度(包括单晶和多晶石英，以及主要由石英组成的岩石碎屑)作为其模型中的组成参量。但是，石英并不是唯一的机械和化学稳定因素。

(2) 碎屑颗粒粒径 孔隙度与粒径的关系比较复杂。有些砂岩的孔隙度明显受粒径的影响，如普鲁德荷湾油田 Irishak 组含燧石的亚岩屑质砂岩和岩屑砂岩(图2—2)、阿拉斯加北斜坡的 Kekiktuk 组石英岩屑质砂岩和含燧石的亚岩屑质砂岩(Bloch 等, 1990) 以及 Arkoma 盆地 Hartshorne 组富含石英(石英总量 $>80\%$)的砂岩中(Houseknecht, 1984)，

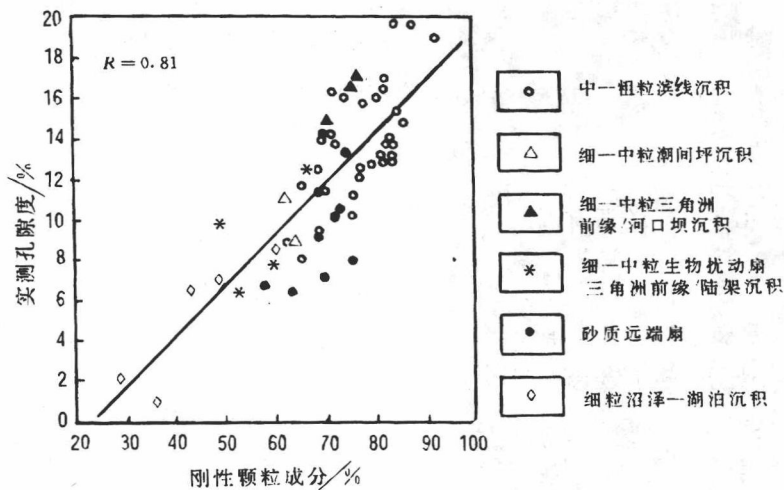


图 2—1 中国南海崖城油田砂岩刚性颗粒成分
(全部石英、钾长石和花岗岩岩屑) 与孔隙度关系图
(据 Bloch, 1991)
(R 为相关系数)

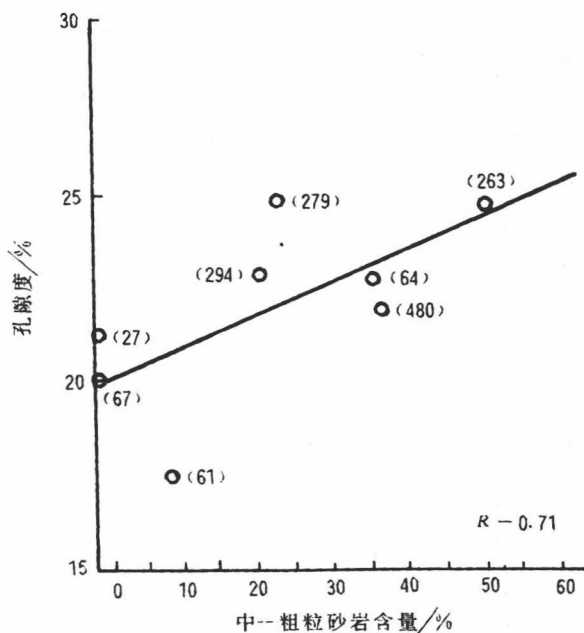


图 2—2 普鲁德荷湾油田 Irishak 组砂岩内中到粗粒相对含量与孔隙度关系
(据 Bloch, 1991)
(R 为相关系数)

粒径与孔隙度有很强的相关性。但是也有例外，崖城油田的长石砂岩和岩屑长石砂岩的孔隙度与粒径之间的关系很松散，相关系数仅有 0.42。Houseknecht (1984) 把粒径与孔隙度

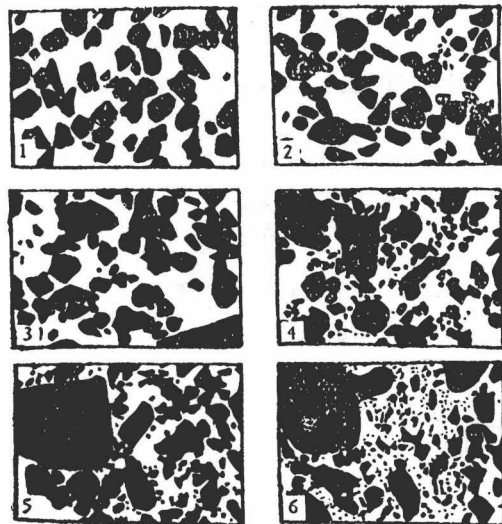


图 2—3 分选系数对孔隙度的直观影响图
(据 Beard 和 Weyl, 1973)

1. 分选极好 ($S_0=1.0\sim 1.1$); 2. 分选很好 ($S_0=1.1\sim 1.2$); 3. 分选好 ($S_0=1.2\sim 1.4$); 4. 分选中等 ($S_0=1.4\sim 2.0$); 5. 分选差 ($S_0=2.0\sim 2.7$); 6. 分选极差 ($S_0=2.7\sim 5.7$)

之间的逆向关系归因为粒径对粒间压溶影响的结果。然而,砂岩电子显微探针阴极发光测定表明,即使在很细粒砂岩中,碎屑颗粒间(除了缝合线)的压溶作用也没有定量的意义。进一步讲,并不是所有富含石英的砂岩粒径都与孔隙度相关。

(3) 分选系数 分选系数对孔隙度的影响可以从 Beard 和 Weyl (1973) 提出的关系图上直接看出(图 2—3),即颗粒分选越差,杂基中较细小的颗粒充填并堵塞了孔洞和喉道,不仅降低了孔隙度,也降低了渗透能力。如果将颗粒直径的因素考虑在内,则可以分成两类情况:当分选系数 (S_0 值) 小于 2 时,各种粒径的砂岩孔隙度均随分选系数增大而减小;当分选系数大于 2 时,粗粒和极细粒的砂岩孔隙度当分选系数增大时仍可基本保持不变,而一般常见的中粒及细粒砂岩,其孔隙度将随分选系数的增大而下降,但下降较缓。

中国南海崖城油田砂岩分选系数(特拉斯克分选系数)与孔隙度表现出相当密切的关系(图 2—4)。

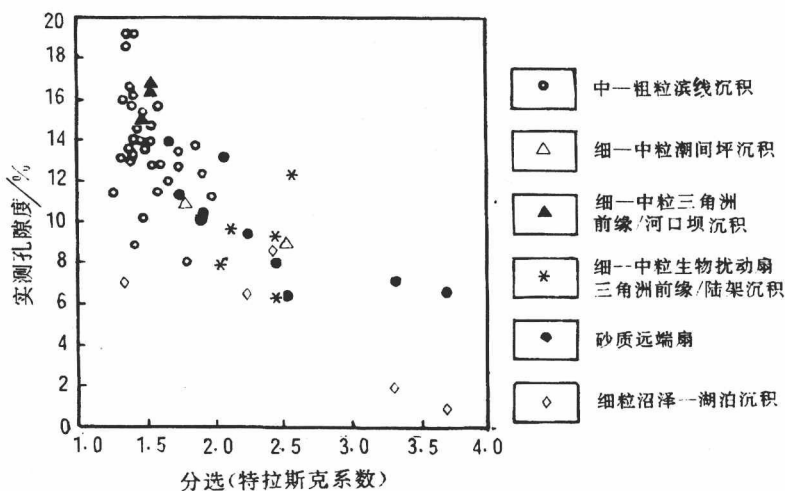


图 2—4 中国南海崖城油田砂岩特拉斯克分选系数与孔隙度关系图
(据 Bloch, 1991)

(4) 磨圆度 砂粒的磨圆度对孔隙度有直接的影响。日本的小松直幹(1978)指出,据大量实际资料来看,如果砂岩的磨圆度好,其分选就会好,孔隙度也较好。但是,砂粒的