



[美] Wayne M. Ahr 著

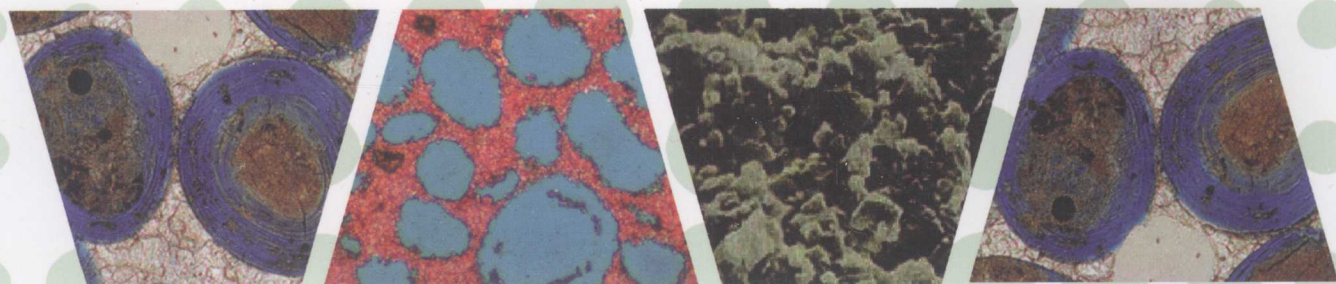
姚根顺 沈安江 郑剑锋 等译



中国石油勘探开发研究院出版物

# 碳酸盐岩储层地质学

## ——碳酸盐岩储层的识别、描述及表征



Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks

石油工业出版社  
Petroleum Industry Press



014003474

P618.130.2  
05

# 碳酸盐岩储层地质学

——碳酸盐岩储层的识别、描述及表征

[美] Wayne M. Ahr 著

姚根顺 沈安江 郑剑锋 乔占峰 张建勇 王鹏万  
辛勇光 张先龙 刘群 罗宪婴 陆俊明 王小芳

译



P618.130.2  
05

石油工业出版社



北航 C1691320

## 内 容 提 要

本书系统介绍了碳酸盐岩储层研究的基本原理及如何识别、分析和预测不同类型碳酸盐岩储层,强调了孔隙成因类型与碳酸盐岩储层属性的关系,对国内碳酸盐岩储层油气勘探具有重要的指导意义。

本书可供油气地质、地球物理及油藏工程人员参考,也可作为高等院校相关专业师生中的重要参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

碳酸盐岩储层地质学——碳酸盐岩储层的识别、描述及表征 /  
(美) 阿尔著;姚根顺等译. —北京:石油工业出版社, 2013.8

书名原文: Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification,  
Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in  
Carbonate Rocks

ISBN 978-7-5021-9448-2

I. 碳…

II. ①阿… ②姚…

III. 碳酸盐岩—储集层—研究

IV. TE344

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 012166 号

著作权合同登记号: 图字 01-2009-6505

Copyright © 2008 by John Wiley & Sons. All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Geology of Carbonate Reservoirs: The Identification, Description, and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks; ISBN 978-0-470-16491-4; by Wayne M. Ahr. Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523544 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本: 1/16 印张: 14

字数: 312 千字

定价: 60.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

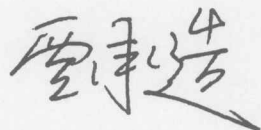
## 中文版序

中国海相碳酸盐岩层系油气资源量占全国油气总资源量的 40% 以上，是油气资源战略接替的主要领域。但由于我国海相碳酸盐岩层系主体位于深层，受地质条件与工程技术的制约，对深层碳酸盐岩储层的发育机理和分布规律的认识及勘探程度较低。近年来，随塔里木盆地哈拉哈塘—塔河—轮南、塔中地区和四川盆地普光、龙岗、磨溪—高石梯地区规模海相碳酸盐岩油气田的相继发现，昭示着我国海相碳酸盐岩油气勘探进入大发现期。但与 20 世纪 50—70 年代全球碳酸盐岩油气藏的发现高峰期相比，我国海相碳酸盐岩油气藏发现要晚近 40 年。因此，国外的海相地层油气勘探理论值得我们去认真学习和借鉴。

碳酸盐岩储层是海相地层油气勘探面临的主要科学问题之一，也是制约海相碳酸盐岩地层油气勘探的“瓶颈”技术之一。杭州地质研究院以中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室为载体的核心研究团队，于 2008 年翻译出版了 Clyde H. Moore 教授的专著《碳酸盐岩储层——层序地层格架中的成岩作用和孔隙演化》，于 2010 年翻译出版了 Peter A. Scholle 和 Dana S. Ulmer-Scholle 的专著《碳酸盐岩岩石学——颗粒、结构、孔隙及成岩作用》，引进了碳酸盐岩岩石学和储层成因方面的国际前沿理论，促进了“十一五”国内碳酸盐岩储层研究水平的提升。本次组织翻译的《碳酸盐岩储层地质学——碳酸盐岩储层的识别、描述及表征》，重点论述了碳酸盐岩储层研究的基本原理和识别方法，强调了孔隙成因类型与储层属性的关系，为碳酸盐岩储层的识别、描述及表征提供了有效的手段。该书是对前两本译著内容的补充和完善，与前两本译著一起共同构成了碳酸盐岩岩石学和储层地质学知识体系。相信该译著的出版一定会对“十二五”国内碳酸盐岩储层研究起到积极的推进作用。

我国海相油气勘探需要不断发展与创新石油地质理论，及时了解学科前沿。杭州地质研究院长期以来以海相碳酸盐岩沉积储层研究为特色，本译著的出版对杭州地质研究院海相碳酸盐岩研究特色和优势起到进一步的推动作用。希望该译著的出版能达到以下两个目的：一是把代表国外碳酸盐岩储层的识别、描述及表征的前沿理论介绍给国内同行，以提升国内在该领域的研究水平；二是满足国内海相碳酸盐岩储层表征和评价研究的需求。

中国科学院院士



2013 年 5 月 30 日

## 前 言

这是一本介绍碳酸盐岩油气储层地质学的书。尽管这本书是为石油地质学家、地球物理学家和工程师而写的，但它对水文地质学家和环境地质学家来说也是一本有用的文献资料，因为储层和含水层的差别只是所包含的流体不同。对污染物疏导或污水处理感兴趣的环境地质学家同样需要了解地下地层的孔隙度（储存能力）和渗透率（流动能力）。前两章的重点是定义对流体运动产生影响的岩石属性，第3章的重点在储层属性（岩石和流体的相互作用）以及岩石属性是如何影响饱和度、润湿性、毛细管作用、毛细管压力和储层“质量”。尽管碳酸盐岩与硅质碎屑岩在很多方面有着不同，但是主导陆源砂岩中流体运动的物理规律也同样适用于碳酸盐岩，因此，本书所讨论的很多原理适用于任何一种多孔和渗透性好的储层和含水层。碳酸盐岩和硅质碎屑岩之间的基本差异通篇都有强调，了解这些差异对勘探、开发及对储层和含水层的管理都是有用的。

本书最初是我在得克萨斯 A&M 大学的碳酸盐岩储层教程，它是为在读研究生和进修本科高级课程的地质学家、工程师和地球物理学家而写的。我希望本书对石油工业界的专家，尤其是碳酸盐岩储层方面的专家同样是一本有用的继续教育课程和书籍。我很难用这么短的篇幅来概述这门学科，因此，本书重点强调的是基本原理。要把当前大量的碳酸盐岩沉积学、地层学、地球化学和岩相学内容均纳入到本书中是不现实的，也是不可能的。

本书没有用太多的钻井和地震资料，因为这些资料需要用实例来做较长篇幅的解释，而这超出了本书的范围、目的和篇幅限制。我已经通过在每章的最后提供一些后续阅读的建议来弥补这些不足。这是一本为学生而写的书，并非为专家而写。在过去的 38 年，我一直教授大学课程和再教育课程，并了解到学员从大学或短期再教育课程中能学到的知识很有限，因此，我将本书的材料都限定到大学或短期再教育课程应该学的内容范围。显然，我不得不仔细筛选题材和文献资料，尤其是那些最有利于理解碳酸盐岩和储层的题材。包括 Chilingar (1992)、Lucia (1999) 和 Moore (2001) 在内，他们编写的碳酸盐岩储层方面的书籍，侧重点在碳酸盐岩储层工程 (Chilingar 和 Lucia)，或碳酸盐岩层序地层学 (Moore)，而不是对碳酸盐岩储层地质的整体介绍。

我写这本书的目的是帮助大学生和石油工业界的专家更多地了解碳酸盐岩储层是如何、何时及在哪里形成的，如何识别、分析和预测不同类型的碳酸盐岩储层，如沉积型储层、成岩型储层及裂缝型储层，尤其强调了孔隙成因类型与碳酸盐岩储层属性之间的关系。最后，阐述了基于孔隙成因类型的碳酸盐岩孔隙分类。本书反复强调两个主题：① 不观察岩石不可能理解碳酸盐岩储层；② 没有一套碳酸盐岩孔隙的成因分类，不能预测碳酸盐岩储层的时空展布。

开发地质学家和工程师会发现这本书很有用，勘探地质学家和地球物理学家也会有同感。开发地质学家和工程师觉得这本书有用是因为该书强调了岩石和储层特征之间的关系。勘探家会发现碳酸盐岩储层不同成因类型孔隙的区分是很有用的，因为勘探策略需要建立在地质理念上，而地质理念的建立基于对孔渗性好的储层在特定沉积相、成岩相和裂缝性岩石中是如何发育和分布的认识。

在勘探和生产方面，石油地质学家有类比的习惯，类比法应该有批判性地应用。而无批判性地应用类比法实际上是假定特定地质年代和地质背景的储层地质模型可以应用于其他地质年代和地质背景，而未关注储层特征可能存在的差异。很多时候，地质家发现他们自己不得不面对无批判性地应用类比法所带来的解释难题，如似乎完全可以与已知储层相类比的另外一套储层，而结果恰恰是在沉积期或成岩期孔隙已消失殆尽，导致预测失败；又如似乎完全可以与已取得成功的构造和地层圈闭模式相类比的圈闭，钻到目的层的结果却是空的。类比提供了无限制的“相同性”，但对解释意想不到的结果毫无帮助。类比法不能为碳酸盐岩特有的各种地质背景中寻找油气藏提供信息，也不能为碳酸盐岩储层最有效和最有利的开发方式提供必要的信息。

本书强调的是阐述地质观念的方法，而不是通过类比法预测孔隙度和渗透率的时空展布。孔渗的最佳结合及流体最小阻力单元被称为流动单元（后文将会讨论该术语的起源）。当流动单元可以识别时，并且随岩性和储层特征的变化而变化时，则可对孔渗分布精确制图、储量计算和经济预测。以前的开采方法已经产出了全球原油地质储量的三分之一，还有大概  $8910 \times 10^8 \text{ bbl}$  原油或更多的原油有待开采（Ahlbrandt 等，2005）。如果包括非常规油和天然气的话，数字会更大。如果油藏流动单元分布图的精度比以前更高的话，那么  $1 \times 10^{12}$  剩余储量的大部分可以通过改善开采方法而得到更有效的开采。在已知流动单元的大小、形态和连通性的情况下，尤其是在当前高油价的背景下，二次及三次采油方法同样是有经济价值的。考虑到深水勘探和生产的巨大投资、地缘政治冲突的风险、钻遇干井的风险，那么二次、三次开采就显得尤为重要了。同样重要的是，如果石油地质学家能够精确编制含水层连通性图件，那么对地下水流动模型或污染物搬运路径的认识将会得到很大的提高。如果流体障碍物可以更精确地描绘出来，那么危险废弃物投放地点的评估可以得到显著的改进。总之，有很多令人兴奋的理由来使我们学习碳酸盐岩储层和含水层的相关知识。

如果没有上这门课（碳酸盐岩储层）的研究生对我的鼓励以及他们不断地请求我写一本教科书，那么我可能不会写这本书。我的老朋友 Robert Stanton 读了早期版本的几个章节，并给了建设性的意见。Rick Major 和 P. M. (Mitch) Harris 看了早期版本的整个手稿，他们给予的鼓励、指导使我坚持把这本书写完，他们提出的修改意见使本书得到了很大的完善。

Wayne M. Ahr

得克萨斯州

2007年12月

## 关于此书

为了从储层的层面上理解碳酸盐岩，首先得从孔隙开始。碳酸盐岩储层是指具有一定的孔隙度、渗透率并含有烃类的岩石。有三种成因的碳酸盐岩孔隙：沉积孔隙、成岩孔隙和裂缝孔隙。当然，也会发育一些过渡类型的孔隙，但关键是这三种主要的碳酸盐岩孔隙类型分别代表了明显不同的地质作用。在完全认识到这些差异，并能准确地识别各种碳酸盐岩储层类型之前，人们必须理解碳酸盐岩是什么，它们是如何、何时形成的，以及它们是如何形成储层的，也必须理解储层、圈闭和盖层之间的差异，并且学习一些储集岩层所包含的流体的特征。碳酸盐岩是由各种颗粒、灰泥杂基和胶结物构成的。骨架、非骨架颗粒及灰泥和胶结物包含了大量发育储层的沉积环境和成岩环境的信息。本书从定义入手，讨论碳酸盐岩如何、何地以及怎么形成的，如何利用基本岩石属性进行碳酸盐岩的分类。储层孔隙度和渗透率受岩石基本属性控制。本书探讨了岩石分类与传统孔隙分类之间的相关性或不相关性。储层含有流体，因此本书还探讨了饱和度、润湿性、毛细管作用和毛细管压力等方面的储层属性。

本书简述了地球物理测井（裸眼井）方面的问题，因为测井资料提供了三级岩石属性信息。测井资料为建立静态和动态储层模型、计算饱和度和可动油体积等流体属性，进行地层对比及解释未取样井段的岩性特征等提供重要的信息。因为已经有大量测井方面的文献，所以这里只是简要的提及。当今的数字技术和尖端的计算机软件满足了那些擅长在计算机辅助下进行测井解释的岩石物理学家的需求。即使所有公司和大学实验室都有现代电脑辅助的测井评价软件，但地质学家仍然需要熟悉那些在碳酸盐岩储层研究中非常有用的测井类型。

用于勘探和开发的地震方法在本书也只是被简单地提及，因为地震学方法在勘探和储层分析中应用的详细论述已经超出了本书的范畴。在每个章节的最后都有筛选过的文献可以帮助读者找到更多的相关信息。

随着对岩石属性和储层特征分类系统的讨论，回顾基本的沉积学和地层学原理有助于解释碳酸盐岩台地特征、地层对比关系和沉积相，其目的是指导读者理解沉积模式和极大地简化了的代表不同类型台地特征的“标准沉积序列”。标准沉积序列将会成为沉积型储层的模型（储集岩的孔隙是沉积成因的）。在沉积模式和沉积型储层类型的讨论之后，本书还讨论了成岩环境和成岩作用，其目的就是解释碳酸盐岩在各种成岩环境中是如何通过化学的和机械的作用使孔隙产生、加大或减小。最后，在读者对岩石、储层特征、沉积及成岩作用和特征有一个全面的认识后，本书讨论了裂缝型储层。每个章节之后都列出了判别和解释沉积型储层、成岩型储层和裂缝型储层特征要点。

最后一章对全书观点进行了总结，并列举了一些精选过的关于沉积型、成岩型和裂缝型储层的实例。

## 井出干关

Wayne M. Ahr

一、引言  
二、地质背景  
三、储层类型  
四、裂缝发育  
五、成岩作用  
六、储层评价  
七、结论

储层评价是油气勘探中的关键环节，涉及地质、地球物理、地球化学等多学科的综合应用。本文旨在探讨沉积型、成岩型和裂缝型储层的特征及其评价方法。首先，介绍了研究区的地质背景，包括构造演化、沉积序列和岩性组合。其次，详细分析了不同类型储层的发育机制和分布规律。沉积型储层主要受沉积速率和埋藏深度控制；成岩型储层则与有机质成熟度和成岩作用密切相关；裂缝型储层则受构造应力场和岩性脆性的影响。最后，结合实例讨论了储层评价的综合方法，包括测井解释、地震反演和地质建模等。通过对比分析，明确了不同类型储层的识别标志和评价流程，为类似地区的勘探开发提供了理论依据和技术支持。



# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 碳酸盐岩储层定义	2
1.1.1 碳酸盐	2
1.1.2 储层	3
1.2 碳酸盐岩储层的成因和预测	5
1.3 碳酸盐岩的独特属性	6
延伸阅读的建议	8
复习题	8
第 2 章 碳酸盐岩储层的岩石特征	10
2.1 岩石基本特征	11
2.1.1 结构	11
2.1.2 组构	14
2.1.3 组分	15
2.1.4 沉积构造	17
2.2 碳酸盐岩分类	18
2.2.1 碎屑碳酸盐岩分类	20
2.2.2 生物礁分类	21
2.2.3 Wright 的成因分类	23
2.3 岩石其他特征	23
2.3.1 孔隙度	24
2.3.1.1 孔隙分类	27
2.3.1.2 Archie 的孔隙分类	27
2.3.1.3 Choquette 和 Pray 的孔隙分类	28
2.3.1.4 Lucia 的孔隙分类	30
2.3.2 一种新的碳酸盐岩孔隙成因分类	33
2.4.3 渗透率	34
2.4 岩石的延伸特征	37
2.4.1 测井曲线和碳酸盐岩储层	37
2.4.2 岩石延伸特征与地震检波器	42
延伸阅读的建议	42
复习题	43

<b>第3章 碳酸盐岩储层的岩石物理特征</b> .....	44
3.1 饱和度、润湿性及毛细管作用 .....	44
3.1.1 饱和度.....	44
3.1.2 润湿性.....	48
3.1.3 毛细管作用.....	49
3.2 毛细管压力和储集性能 .....	50
3.2.1 毛细管压力、孔隙及喉道.....	51
3.2.2 空气—汞蒸气毛细管压力与油—水毛细管压力的换算.....	54
3.2.3 自由水界面之上的油柱高度.....	55
3.2.4 封盖能力评估.....	55
3.3 流体退出效率 .....	55
延伸阅读的建议.....	57
复习题.....	57
<b>第4章 地层学原理</b> .....	59
4.1 碳酸盐沉积台地 .....	60
4.1.1 镶边台地和开阔陆棚.....	62
4.1.2 均斜缓坡和远端变陡缓坡.....	63
4.2 岩石、年代和年代—岩石单元 .....	64
4.2.1 岩石单元.....	64
4.2.2 年代单元.....	65
4.2.3 年代—岩石单元.....	66
4.3 地层对比 .....	66
4.4 沉积单元解剖 .....	68
4.4.1 相、相序、层序.....	70
4.4.2 沉积环境的划分及标准沉积序列.....	71
4.5 层序地层学 .....	75
4.5.1 定义和范围尺度.....	75
4.5.2 碳酸盐岩储层中的层序地层.....	78
4.5.3 勘探和开发中的层序地层.....	78
延伸阅读的建议.....	79
复习题.....	80
<b>第5章 沉积成因碳酸盐岩储层</b> .....	81
5.1 沉积成因孔隙 .....	82
5.2 沉积环境与沉积作用 .....	83
5.2.1 海滩—沙丘环境.....	84
5.2.2 海滩—沙丘序列的沉积岩特征.....	85
5.2.3 潮坪和潟湖环境.....	89

5.2.4	潮坪—泻湖序列的沉积岩特征	91
5.2.5	浅水潮下环境	92
5.2.6	浅水潮下带序列的沉积岩特征	94
5.2.7	斜坡—坡折环境	95
5.2.8	斜坡—坡折序列的沉积岩特征	95
5.2.9	斜坡环境	96
5.2.10	斜坡和坡脚环境的沉积序列特征	97
5.2.11	盆地环境	98
5.2.12	盆地环境的沉积序列特征	99
5.2.13	理想的沉积序列模式	101
5.3	古地貌和沉积相	105
5.4	沉积型储层的识别与预测	106
	延伸阅读的建议	107
	复习题	107
<b>第6章</b>	<b>成岩成因的碳酸盐岩储层</b>	<b>110</b>
6.1	成岩作用及成岩过程	110
6.1.1	成岩作用定义	110
6.1.2	成岩过程	111
6.2	成岩成因的孔隙度	114
6.3	成岩环境和成岩相	117
6.4	成岩作用与孔隙度的加大	119
6.4.1	重结晶作用与孔隙度的加大	120
6.4.2	溶解作用与孔隙度的加大	122
6.4.3	与大规模溶蚀作用相关的孔隙	123
6.4.4	交代作用与孔隙度的加大	124
6.4.5	次生加大孔隙的识别	124
6.5	成岩作用与孔隙度的减小	125
6.5.1	压实作用与孔隙度的减少	126
6.5.2	重结晶作用与孔隙度的减少	126
6.5.3	交代作用与孔隙度的减少	127
6.5.4	胶结作用与孔隙度的减少	127
6.5.5	识别成岩作用引起的减少的孔隙	130
6.6	成岩型储层的识别与预测	131
	延伸阅读的建议	133
	复习题	134
<b>第7章</b>	<b>裂缝型储层</b>	<b>135</b>
7.1	裂缝及裂缝型储层	135

10	7.1.1	裂缝的定义	135
50	7.1.2	裂缝的类型	136
10	7.1.3	裂缝的成因分类	137
20	7.1.4	裂缝的形态	139
20	7.1.5	裂缝发育场所	142
00	7.2	裂缝的孔隙度、渗透率和含水饱和度	143
70	7.2.1	裂缝的渗透率	144
20	7.2.2	裂缝的孔隙度	144
00	7.2.3	裂缝型储层中的含水饱和度 ( $S_w$ )	146
10	7.3	裂缝型储层的分类	146
20	7.4	裂缝型储层的探测	147
00	7.4.1	井眼直接观察裂缝	148
70	7.4.2	井眼间接探测裂缝	148
70	7.5	裂缝空间分布和密度的预测	150
0	7.6	裂缝型储层的成因和识别	150
0		延伸阅读的建议	152
0		复习题	152
	<b>第 8 章</b>	<b>总结：碳酸盐岩储层地质学</b>	<b>154</b>
10	8.1	岩石属性和识别方法	154
70	8.1.1	岩石的基本属性和沉积型储层	155
00	8.1.2	储层的形态	156
00	8.1.3	次生属性：孔隙度和渗透率	156
50	8.1.4	三级属性和岩石物理特征	157
50	8.2	资料要求	158
10	8.2.1	区域规模的地质调查	158
10	8.2.2	油田规模的研究	159
50	8.2.3	流动单元的定性分级	159
00	8.2.4	孔隙特征	160
0	8.3	沉积型储层	160
70	8.3.1	沉积型储层的识别和解释	160
70	8.3.2	沉积型储层实例	163
00	8.3.2.1	North Haynesville 油田	163
10	8.3.2.2	Conley 油田	167
00	8.4	成岩型储层	171
10	8.4.1	成岩型储层的识别和解释	171
70	8.4.2	成岩型储层实例	172
70	8.4.2.1	Overton 油田	173

8.4.2.2 Happy 油田 .....	177
8.5 裂缝型储层 .....	181
8.5.1 裂缝型储层的识别和解释 .....	181
8.5.2 裂缝型储层实例 .....	182
8.5.2.1 Quanah City 油田 .....	182
8.5.2.2 Dickinson 油田 .....	185
8.6 结论 .....	189
复习题 .....	192
参考文献 .....	194

# 第1章 绪论

本书力求用通俗的语言为非专业人士解释碳酸盐岩是如何形成的，在哪里形成的，以及它们为什么能够或不能够发育成储层，如何在地下寻找碳酸盐岩储层或含水层，一旦发现了储层该如何开发。本书围绕碳酸盐岩储层的孔隙成因分类进行编排，这种成因分类方法有利于在勘探和开发中的应用。有三种成因类型的孔隙——沉积成因孔隙、成岩成因孔隙和裂缝。成岩成因孔隙与成岩和埋藏过程中形成、减少或扩大孔隙的地质作用有关。最后，把孔隙形成的年代及演化放到更大的地层格架背景中，目的是有利于储层流动单元、隔板和阻挡层的识别。通过储层中不同孔隙类型的孔隙度和渗透率值范围的确定来评估连通性，如果连通的孔隙体系在侧向上具有地层上的可对比性，那么就可以识别出具有最好的孔渗和最少的流动阻力的储层发育带。本书将这样的储层发育带定义为储层流动单元，与Ebanks (1987; Ebanks等, 1992)的定义基本相似，但与阻碍流体流动的隔板层及阻挡流体流动的阻挡层不同。每种类型的储层都有自己典型的物性特征（孔隙度和渗透率），其与岩石特性和地层特性（钻孔大小特征）相关。当储层发育带可以识别出好、一般和差的连通性时，与之相关的岩石特征和地层特征能够成为连通性的指标。通常，特征或指标的尺度越大，越容易通过钻井、测井和地层“堆积样式”信息进行识别。如果岩石特征和地层特征的成因方式和时间是已知的，那么就可以建立地质模型来预测储层流动单元在油区的空间分布。换言之，与好、一般和差的孔渗值相对应的基本岩石特征可以被识别出来，置于大的地层背景中或被“放大”。然后，大尺度的岩石特征和地层特征可被用于储层预测和绘制流动单元图。

碳酸盐岩储层孔隙的形成通常是多种地质作用叠合的结果。有时，它反映了多期埋藏的幕式变化。因此，必须特别注意识别导致岩石特征和孔隙特征最终状态的事件及序次。通常，岩石特征之间的相互交割关系是识别它们形成时间的相对序次的有效方法。如果储层的孔隙是完全受沉积岩的特征所控制的（很不常见的储层），岩石特征之间的相互交割关系不明显，因为岩石的结构、组构、孔隙度和渗透率的成因方式和形成时间是单一的。在这种情况下，储集体的形态和空间分布受沉积相边界控制。这类储层被认为是受地层控制的，孔隙具相选择性、组构选择性或两者兼有。成岩作用和断裂并不总是沿着沉积单元边界发生的。尽管碳酸盐岩储层的成岩孔隙有时与沉积岩石特征是一致的（当成岩作用也具有组构选择性或相选择性特征时），但这种情况很少见。在不一致的情况下，识别成岩作用类型、发生机理、发生时间、组构特征间的交割关系尤为重要。裂缝大多切割岩石界面，但是，有很多基本岩石特征控制了裂缝发育的方式和位置。裂缝的发育是在不同应力条件下脆性破裂的结果，通常与断层或褶皱作用相伴生。断层和褶皱的几何形态是可以确定的，因此，与之有关的裂缝发育样式也同样可以确定。简言之，碳酸盐岩的很多岩石及其物理特征可以提供大量的碳酸盐岩储层成因、形态和分布的信息。

## 1.1 碳酸盐岩储层定义

### 1.1.1 碳酸盐

碳酸盐是由  $\text{CO}_3^{2-}$  阴离子复合体和二价金属阳离子  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Ba}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  以及其他一些不常见的阳离子结合而成的。金属阳离子和碳酸根之间的结合力不如  $\text{CO}_3^{2-}$  内部的结合力强，而  $\text{CO}_3^{2-}$  内部的结合力又没有二氧化碳的共价键结合力强。碳酸根加入氢离子，分解成  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ 。通常，这种分解反应在石灰岩遇到酸溶液时都会发生，这是区分碳酸盐起泡测试的化学原理。同样也可区分白云岩和石灰岩，白云岩起泡缓慢，石灰岩起泡迅速。自然界形成的碳酸盐一般出现在现代热带、温带海洋的沉积物、礁丘、古老岩石和具有重要经济价值的矿床中。常见的碳酸盐根据它们的晶格结构或原子的内部排列进行分类，根据晶体形态可分为六方晶系、斜方晶系和单斜晶系。在六方晶系中最常见的碳酸盐矿物是众所周知的方解石 ( $\text{CaCO}_3$ ) 和白云石 ( $\text{Ca, Mg}(\text{CO}_3)_2$ ) (图 1.1 和图 1.2)。文石和方解石有相同的化学成分  $\text{CaCO}_3$ ，但文石属斜方晶系。方解石和文石是钙方解石的同质多象体，因为它们有相同的成分却具不同的晶体结构。单斜晶系最典型的碳酸盐矿物是碳酸铜——分别是蓝铜矿和孔雀石。白云石与方解石一样，晶体为六边形，但也有与方解石不同的地方。与钙离子相比，镁离子较小，在方解石转变为白云石的过程中，会造成旋转对称上的损失。文石在现代海洋中很普遍，但是在古代岩石中却很罕见，因此，碳酸盐岩储层和含水层是由方解石和白云石——石灰岩和白云岩构成的，并且，石灰岩和白云岩构成了所有自然形成的碳酸盐岩的 90% (Reeder, 1983)，剩下 10% 的碳酸盐矿物中仅有一小部分为蓝铜矿和孔雀石，而且是半稀有矿石，通常在珠宝或其他装饰品中经常见到。

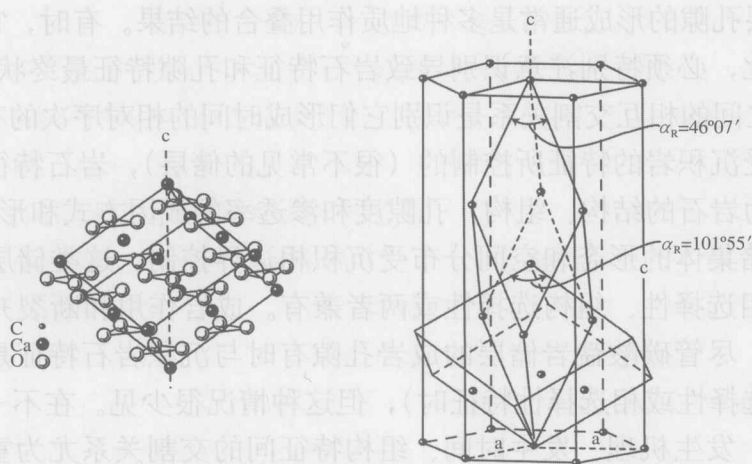


图 1.1 方解石内部原子(晶格)结构(据 Hurlbut 和 Klein, 1977, 修改)

上图的球杆模型展示钙和碳酸根离子在晶格内部成层状分布的位置和排列方式，注意从上到下交替层上三角形碳酸根离子排列方式的变化；下图显示的是方解石六方晶体结构，偏三角面体方解石单晶与晶轴 C 的菱形解理面的相对位置

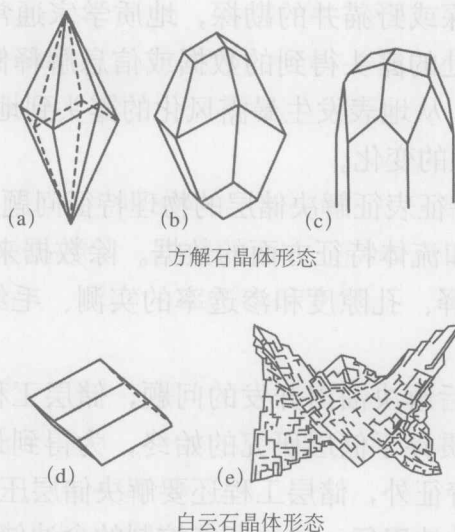


图 1.2 碳酸盐岩中发现的典型方解石和白云石晶体形态 (据 Hurlbut 和 Klein, 1977, 修改)

方解石晶体常见的三种形态为: (a) 偏三角面体的方解石, 有时被称为“犬齿晶体”; (b) 三角晶系复合体; (c) 六方柱, 三角晶系面, 有时被称为“钉头晶体”

白云石晶体常见的两种形态为: (d) 普通斜方六面体, 大多数低温白云石的典型代表; (e) 晶面扭曲的“鞍状白云石”, 鞍状白云石是深埋藏成岩环境形成的典型形态, 有时或被混淆地认为是“热液”白云石

### 1.1.2 储层

储层通常被定义为存储器。对于石油地质学家来说, 储层是含商业价值油气的孔渗性好的岩石体。储层之所以具有孔渗性, 是因为沉积、成岩或裂缝作用的各个过程均可以形成孔隙。虽然我们关注的是碳酸盐岩油气储层, 但也有很多孔渗性好的碳酸盐岩是地下水的含水层。储层是由岩石格架和相互连通的孔隙网构成的三维地质体。如果已知连通孔隙体系的三维几何形态 (大小和形态), 那么可能①确定具有勘探或开发前景的井位, ②估算储层或含水层的资源量, ③实现最乐观的资源开采量, ④在开发阶段, 为达到开发井之间的最佳间距, 确定注水井的位置, ⑤在二次开采和为增大开采率“清扫”残留油气的过程中, 预测流体注入的通道。广义上, 储层研究包括储层地质、储层特征表征和储层工程。为了避免碳酸盐岩储层术语上的混淆, 在下面的章节中将会讨论一些常见的术语。

储层地质学解决储层的成因、空间分布和岩石学性质。储层地质学家利用沉积学、地层学、构造地质学、沉积岩石学、岩相学和地球化学信息来描述储层。这些描述是建立在储集岩的基本特征和形成孔隙体系的地质事件的序次之上的。这些描述的数据来自岩石样品的直接观察, 比如岩心和岩屑。测井和其他地球物理方法能提供有用的信息, 但它们是对衍生和三级岩石特征的间接测量, 这种测量不是直接的观察。直接对沉积组构、组成成分、主要矿物和次生矿物、沉积构造、成岩蚀变和孔隙特征为储层描述奠定了基础。可以通过沉积的、成岩的和构造样式的解释追踪储层发育史, 解释的目的是为了形成地质认识, 进而预测储层的大小、形态和性能特征。在缺乏从钻井得到直接的岩



石数据的情况下,如风险勘探或野猫井的勘探,地质学家通常会研究附近的露头期望储层的年代和地质信息。用远处的露头得到的数据或信息解释储层地质时要特别注意,因为从一个地方到另一个地方,从地表发生暴露风化的露头到地下未发生暴露风化的储层,沉积和成岩特征可能会有很大的变化。

和储层地质一样,储层特征表征解决储层的物理特征问题。与储层地质描述不同,储层特征表征包括了岩石物理和流体特征方面的数据。除数据来自储层岩石的直接观察外,储层特征表征还包括测井解释、孔隙度和渗透率的实测、毛细管压力值的实测、储层流体饱和度和储层驱动机制。

储层工程是储层被发现后解决油田开发的问题,储层工程师的主要目的是实现油气采收率的最大化。经济价值贯穿于储层研究的始终,为得到最大化产量而获取相应的信息。除地质数据和测井曲线特征外,储层工程还要解决储层压力、油—水饱和度和气—油比率的问题,目的是为了评估油田每一口井所能控制的含油储层、可采储量和产能潜力。

石油地质学家不仅研究储层,同样还研究圈闭、盖层和烃源岩,它们构成了 Magoon 和 Dow (1994) 所定义的油气系统的要素。圈闭是油气聚集的场所,油气从烃源岩中生成后向圈闭运移,并限制由圈闭向其他储层的进一步运移。最简单的理解是把圈闭看成一个规模大的几何体,该几何体构成了孔渗性好的储集体的边界。构造、地层、水动力或成岩作用均可以形成圈闭,重要的是要认识到储层—圈闭体系的几何形态与现今的构造轮廓可能是一致的,也可能不一致。地下构造形成后可以被晚期多幕构造运动所改造,地质历史时期的构造高部位可能变成现今的构造低部位或鞍状部位。同样,地质历史时期的构造低部位可能被抬升形成现今的构造高部位,这就是所谓的构造倒置。当地下有可以滑动的岩层或页岩层,以及那些发生多期次构造叠加改造的早期构造,容易形成构造倒置现象。

盖层是一种限制流体从圈闭中流出并通常用毛细管压力来表示的地质体,盖层可以沿着圈闭的高部位、侧部及底部分布。与储层相比,盖层具有高毛细管压力,这是我们定义盖层的基础。盖层和储层的差异通常由岩石类型的变化所引起,如碎屑岩从砂岩到粉砂岩和泥岩的变化,碳酸盐岩从多孔的颗粒灰岩到泥晶灰岩的变化。绝大多数的盖层并不是完全不能渗透,而是不允许较多油气的渗透。完全不渗透的盖层是不常见的,蒸发盐地层除外。

烃源岩富含干酪根和原生有机质,这些物质在埋藏期温度高到一定程度时达到热成熟,并产生油气。烃源岩通常由一些页岩或灰泥岩构成,它们是在缺氧环境中沉积下来的,所富含的脂类有机质被保存并在进一步的埋藏过程中转变为干酪根。

一个综合的石油勘探项目包括了盆地地层和构造的地球物理和地质研究,目的是圈定储集岩最有可能被发现的区域,构造、地层和成岩作用最有可能导致圈闭和盖层形成的区域,烃源岩发育最厚且埋藏期的温度能使烃源岩达到成熟和生烃的区域。在勘探的最初阶段,搞清储层的成因和分布尤为关键。然而,直到一口井完钻之后,储层仍然没有发现。圈闭轮廓可以通过构造和地层异常进行识别,但如果没有油气注入储层,只能让勘探家去打一口干井。当打到成功的油气井后,需要评估这个发现对预测储层大小和