

碳酸盐岩 石油与天然气开采

[美] G. V. 奇林加 R. W. 曼农 H. H. 里克第三 编辑

科学出版社

碳酸盐岩石油与天然气开采

G. V. 奇林加

[美] R. W. 曼 农 编辑

H. H. 里克第三

成都地质学院石油系油矿教研室
四川省石油管理局石油地质综合研究大队 译

科学出版社

1978

内 容 简 介

本书共分七章,其内容有:碳酸盐储集岩、碳酸盐岩的孔隙结构、碳酸盐岩油气藏的流体流动、地层评价、碳酸盐岩油气藏油气储量计算及生产预测、碳酸盐岩油气藏的分类和动态以及碳酸盐岩油气藏的增产措施等,在附录中还简要地介绍了应用岩相学及统计学研究碳酸盐储集岩的方法,列举了44个典型例题及问题,汇集了243个有代表性的碳酸盐岩油气藏的特征及生产数据。这是一部可供从事碳酸盐岩油气藏勘探及开发人员、沉积学工作者、有关高等院校师生和科研人员应用的内容广泛的参考书。

OIL AND GAS PRODUCTION FROM CARBONATE ROCKS

EDITED BY

G. V. Chilingar R. W. Mannon H. H. Rieke, III

American Elsevier Publishing Company, Inc.

New York, 1972

碳酸盐岩石油与天然气开采

G. V. 奇林加

[美] R. W. 曼农 编辑

H. H. 里克第三

成都地质学院石油系油矿教研室 译
四川省石油管理局石油地质综合研究大队

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年6月第一版 开本:787×1092 1/16

1978年6月第一次印刷 印张:17

印数:0001—3,430 字数:388,000

统一书号:13031·754

本社号书:1080·13—14

定价: 2.60 元

译 者 的 话

由奇林加等人编辑的《碳酸盐岩石油与天然气开采》这本书,综合了大量有关资料,共分七章,其内容有:碳酸盐储集岩、碳酸盐岩的孔隙结构、碳酸盐岩油气藏的流体流动、地层评价、碳酸盐岩油气藏油气储量计算及生产预测、碳酸盐岩油气藏的分类、动态以及碳酸盐岩油气藏的增产措施等,在附录中又简要介绍了应用岩相学及统计学研究碳酸盐储集岩的方法,列举了44个典型例题和问题,以及汇集了243个有代表性的碳酸盐岩油气藏的特征及生产数据。这是一本可供从事碳酸盐岩油气田勘探及开发工作人员应用的内容广泛的参考书。

正如编者所述,迄今所积累的有关开采碳酸盐岩油气藏的知识,还不足以作出全面的综合,这本书仍然处于这个领域的“建筑阶段”,而且由于该书执笔人较多,反映了不同作者观点,有些内容似嫌重复,有些概念似不统一。另外,材料内容以引用美国的一般灰岩油田为主,对于有重大经济意义的裂缝性碳酸盐储层的研究、评价、动态方面的讨论不多。

为了适应我国迅速发展的从碳酸盐岩开采石油和天然气的需要,我们翻译了这部著作,希望广大读者遵照毛主席关于“洋为中用”的教导,从我国的实际出发,批判地吸收对我们有用的东西。

本书翻译过程中,承蒙华东石油学院大力帮助,并由张朝琛同志校订全稿,在此表示感谢。由于我们的水平有限,错误和不足之处在所难免,望读者给予批评指正。

译 者

1974年12月

前 言

在碳酸盐岩油藏的勘探及开采中,提出来的若干问题,是这类油藏独有的特性;这些问题的产生是由于碳酸盐岩具有独特的孔隙结构及特殊的化学性质。许多可以用于砂岩的理论和实践经验,对于碳酸盐岩并不确切或毫不适用。例如,流体在高度裂缝性的岩石或溶洞状灰岩中的渗流与在均质砂岩中的渗流,基本上是两种不同的过程。

对于碳酸盐岩油藏的特殊动态特征的现场及实验室研究,基本上未达到它们经济价值所应该进行的程度。然而,已经发表的一系列文章,终将有助发展成专门适用于碳酸盐岩油藏的技术。但是,这些文章分散在大量的石油文献中。本书就是收集了大量这方面的技术,成为一本专题性的、内容广泛的参考书。

关于处理碳酸盐岩油藏中的问题,对某些课题作了专门介绍;而对其它方面仅提出了可能有希望的探讨性建议。书中对于碳酸盐储集岩分类方案已得到令人满意的发展,但应用这些分类来预测油藏动态还需要进一步的研究。虽然近来有几项研究,从各方面报道了裂缝性油藏中渗流问题,但在溶洞状物体内的渗流实验及理论研究仍然有限。已经发展了一些碳酸盐岩油气藏的地层评价的特殊技术,但碳酸盐的非均质性使其解释仍然困难。然而,碳酸盐岩的特有的物理及化学性质,却导致了对这种油藏有显著成效的增产方法的发展。

本书的许多重要贡献之一,是集中注意于碳酸盐岩油藏工程这样一个特殊题目,这个题目就其本身来说,在许多领域内值得并需要作更深入的研究。书中所提供的材料应作为一个中心,可以围绕这个中心形成一个专门与碳酸盐岩油藏有关的内容更为充实的技术主体。

L. L. 汉迪

序 言

正如1968年元月1日“世界石油”杂志所载,估计探明的世界石油储量为3995亿桶。这个储量中的一个很大的百分数是蕴藏在碳酸盐岩中。虽然没有精确的数字可用,看来世界石油储量的35%到50%是储在碳酸盐岩油藏内。碳酸盐岩的如此巨大的储量及其潜在的能力,使得许多石油工程师及地质人员不懈地努力,以求得对碳酸盐岩油藏的性质及其动态有个清晰的了解。本书代表一部分石油工业技术人员集中于这样一个专题的广阔知识的某些方面的联合努力,在可能情况下,通过可以利用的事实,对碳酸盐岩石油及伴生气体开采的全面技术作出了适当的展望。

这本书并不代表这个专题的综合或全面总结,当然,这的确是一个值得赞赏的目标。本书只在这个专题的某些部分也许达到了富有意义的综合或概括。在目前是否已经有可能进行全面的总结或综合还值得怀疑。所谓综合就是把许多个别的要素联系成为一个整体,并直接从已知的定理或既定的原则得到一个相应的结论。看来,现阶段所积累的有关开采碳酸盐岩油藏的知识,还不足以作出全面的综合。我们仍然是处在这个专题的“建筑阶段”,本书的目的毋宁说是把一些建筑砖石(按照作者的判断)堆砌起来,用这样的方法以便对用来分析及估价碳酸盐岩油藏及其动态的现代技术有一个比较清楚的了解。如果本书大体上能对完成此项目的有所裨益,作者就认为已达到了目标。

编 者

目 录

译者的话	(i)
前言	L. L. 汉迪 (vii)
序言	(viii)
第一章	(1)
I. 碳酸盐储集岩绪论	G. V. 奇林加 R. W. 曼农 H. H. 里克第三 (1)
专题现状	(1)
分类系统	(1)
碳酸盐岩的组成及性质	(1)
礁及其探测	(11)
静水压力及动水压力	(13)
用元素组成进行辅助对比	(15)
II. 油气储量计算方法摘要	N. 范温根 (15)
储量计算方法	(15)
采收率因素	(18)
提高采收率的方法	(20)
III. 碳酸盐岩常用地质词汇	G. V. 奇林加 R. W. 曼农 H. H. 里克第三 (20)
参考文献	(21)
第二章 碳酸盐岩的孔隙几何学(基本地质概念)	R. L. 乔德里 (24)
绪言	(24)
碳酸盐岩的分类	(28)
碳酸盐岩孔隙分类	(29)
毛管压力曲线	(31)
毛管压力曲线解释	(35)
孔隙几何学与岩石类型的相互关系	(38)
孔隙几何特征在勘探上的应用	(50)
白云岩的孔隙几何学	(53)
结论	(53)
参考文献	(54)
第三章 碳酸盐岩油藏中流体的流动	M. 费尔森塔尔 H. H. 费雷尔 (55)
绪言	(55)
流体关系	(55)
一次采油	(66)
二次采油	(73)
小结	(84)
参考文献	(85)
第四章 地层评价	L. 德威特 (91)

绪言	(91)
电测井的任务	(92)
电测解释中的定量关系	(93)
用自然电位曲线确定地层水电阻率——SP 图	(96)
常规电阻率测井	(98)
灰岩电极曲线	(103)
感应-电测井	(107)
微电极测井;微测井;接触测井;固定测井	(110)
微侧向测井(微屏蔽、微聚流测井)	(115)
盐水泥浆测井(可动油图;侧向测井-微侧向测井组合)	(115)
双感应-侧向测井	(120)
邻近测井	(123)
声波测井(声速测井)	(123)
放射性测井	(126)
裂缝的探测和评价	(136)
参考文献	(139)
第五章 碳酸盐岩油藏中的油、气储量估算和生产预测..... R. W. 曼农	(144)
绪言	(144)
递减曲线分析法估算储量	(145)
容积法估算石油地下储量	(151)
物质平衡法计算石油储量	(160)
估算储量的经验法	(165)
结论	(165)
参考文献	(166)
第六章 碳酸盐岩油藏的分类和动态.....	
..... H. H. 里克第三 R. W. 曼农 G. V. 奇林加 G. L. 兰内斯	(167)
绪言	(167)
根据流体组分所作的油藏分类	(167)
根据驱动机理所作的油藏分类	(173)
根据孔隙系统类型所作的碳酸盐岩油藏分类	(181)
从实验室的气驱试验确定碳酸盐岩孔隙系统的不均质程度	(183)
碳酸盐岩油藏动态某些理论及实际方面的讨论	(185)
对石油采收率的现代统计研究	(191)
参考文献	(198)
第七章 碳酸盐岩油藏的增产措施.....A. R. 亨德里克森	(201)
绪言	(201)
酸化所用的化学剂及其反应	(201)
酸的类型	(202)
酸的反应速度	(203)
酸化的附加剂	(206)
试验方法	(208)
酸化技术及处理设计	(209)

综合压裂-酸化处理	(217)
摘要及结论	(217)
符号意义	(217)
参考文献	(218)
附录 A 应用岩相学及统计学研究碳酸盐储集岩的某些岩石物理性质	
..... H. H. 里克第三 G. V. 奇林加 R. W. 曼农	(221)
从碳酸盐岩孔隙空间特征确定渗透率.....	(221)
确定孔隙性碳酸盐岩的基本几何特征.....	(224)
描述多孔隙碳酸盐介质的统计概念.....	(225)
参考文献.....	(230)
附录 B 例题及问题.....	G. V. 奇林加 R. W. 曼农 H. H. 里克第三 (232)
附录 C 所选用碳酸盐岩油藏的油藏特性及一次采油动态资料摘要	
..... G. L. 兰内斯 H. H. 里克第三 B. W. 曼农 G. V. 奇林加	(237)

第 一 章

I. 碳 酸 盐 储 集 岩 绪 论

G. V. 奇林加 R. W. 曼农 H. H. 里克第三

专 题 现 状

关于碳酸盐岩油藏物理性质及动态特征的基础知识与资料,显然比砂岩油藏少。这主要是由于灰岩与白云岩的孔隙系统远较砂岩复杂,因为碳酸盐岩通常经受更为错综复杂的沉积环境以及沉积后的变化^[1]。从历史上看,在石油及天然气开采中,用以阐述富有意义的物理原理的最初研究工作大部分是利用具有粒间孔隙的砂岩油气藏进行的。虽然这类知识大部分可以谨慎地用于碳酸盐岩油藏,然而有些资料必须大加修改及补充才能应用。一般说来,本书作者致力于通常只能用于碳酸盐岩领域的有关内容。同时,为了提供相当广泛的适应性,作者试图从可以应用于所有油藏类型的广阔角度来处理灰岩及白云岩特有问题的讨论与论述。

分 类 系 统

已经提出了几种概括碳酸盐岩的各个方面,包括流体及其动态的分类系统。一个好的分类方案应当简单明了,使对所研究的这种系统有所影响的众多因素,都能恰如其分地包括进去。另一方面,由于分类系统自身固有的性质,往往有约束、限制、归类及尽量简化的倾向。在对待碳酸盐岩的复杂孔隙系统及其包含的流体时,这些特点则是不相宜的。但是,即使已作的理论及实际观察都有些局限性,仍然希望所提出来的分类系统在研究碳酸盐岩油藏时对读者有所帮助。

碳酸盐岩的组成及性质

灰岩由 50% 以上的碳酸盐矿物所组成,其中 50% 或更多为方解石及(或)文石。由于混有少量粘土质点或有机质,使灰岩带灰色,因此灰岩可以呈白色、灰色、深灰色、淡黄色、淡绿色,或兰色,有的甚至为黑色。白云岩含有 50% 以上的白云石矿物($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)及方解石(加上文石),其中以白云石为主。纯粹白云石矿物重量比为 45.7% MgCO_3 及 54.3% CaCO_3 组成,或 47.8% CO_2 、21.8% MgO 及 30.4% CaO 。白云岩在外观上与灰岩颇相似,因此很难用肉眼区分。根据 CaO/MgO 的比值,佛罗洛娃^[2]提出了列于表 1 的分类。碳酸盐岩的成因、产状、分类及物理化学状况已由奇林加等人^[3,4]详细阐述过。碳酸盐岩文献

表 1 弗罗洛娃按白云石-菱镁矿-方解石系列的分类^[1]

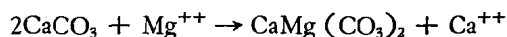
名 称	含 量 (%)			CaO/MgO 比 值
	白 云 石	方 解 石	菱 镁 矿	
灰 岩	5—0	95—100	—	>50.1
微白云质灰岩	25—5	75—95	—	9.1—50.1
白云质灰岩	50—25	50—75	—	4.0—9.1
方解石白云岩	75—50	25—50	—	2.2—4.0
微方解石白云岩	95—75	5—25	—	1.5—2.2
白 云 岩	100—95	0—5	—	1.4—1.5
极微镁质白云岩	100—95	—	0—5	1.25—1.4
微镁质白云岩	95—75	—	5—25	0.80—1.25
镁质白云岩	75—50	—	25—50	0.44—0.80
白云质菱镁矿	50—25	—	50—75	0.18—0.44
微白云质菱镁矿	25—5	—	75—95	0.03—0.18
菱 镁 矿	5—0	—	95—100	0.00—0.03

常用的一些地质名词将在本章末尾所附词汇中解释。

尽可能正确地估价碳酸盐岩的各种性质是很重要的。一个相当好的例子是二叠系盆地中的富勒顿·克利福克白云质灰岩油藏,布尔内斯和菲廷^[5]报道过这个油藏 82% 的岩心样品,其渗透率均小于 1 毫达西。正如第五章中所讨论的,在这样的情况下应当用什么值作最低生产渗透率的问题是非常尖锐的。根据布尔内斯和菲廷的看法,如果采用 1 毫达西作为最低生产渗透率而不用 0.1 毫达西的实际值,结果使估计的最终采收率将有 70% 的误差。某些碳酸盐岩的岩心分析由于具有裂缝及溶洞而复杂化。为了分析这种岩心,已发表了“全”或“大”岩心分析法,也就是整段岩心分析来代替“塞”状小岩心的方法。

孔隙度及渗透率

奇林加等^[1]曾经研讨过碳酸盐岩的成岩作用,包括白云岩化以及由此而产生的孔隙。方解石被白云石置换时,如果反应按下式进行将引起大约 12—13%^[6]的体积收缩(孔隙度增加):



显然,如果具备固体骨架(如海百合茎)以减弱随后压实作用的影响,白云岩化将使孔隙度增大。碳酸盐类后来在孔道中沉淀也可以破坏由于白云岩化而形成的后成孔隙。根据深入的统计学研究^[4,6,7],认为白云岩化可能增加孔隙度。因而绘制等钙-镁比(Ca/Mg)的等值线及确定钙-镁比降低的方向对勘探石油是有用的。

伊朗阿斯马里灰岩的孔隙度与白云岩化程度间的关系列于图 1。因为在 20℃ 时,方解石的密度为 2.71 克/立方厘米,而白云石是等于 2.87 克/立方厘米,因而伊朗的碳酸盐岩的孔隙度与密度之间也有一个确定的关系^[1]。从低孔隙度组(0—4.1%)的密度为 2.7 克/立方厘米到高孔隙度组(≥12.1%)的密度为 2.8 克/立方厘米之间有一逐渐变化的倾向^[1]。

正如图 2 及图 3 所表示的那样,总孔隙度与岩石的密度及电阻率有一定的关系。

原生沉积相的变化,常常对后成孔隙度及渗透率的形成有强烈的影响,因而应加强古

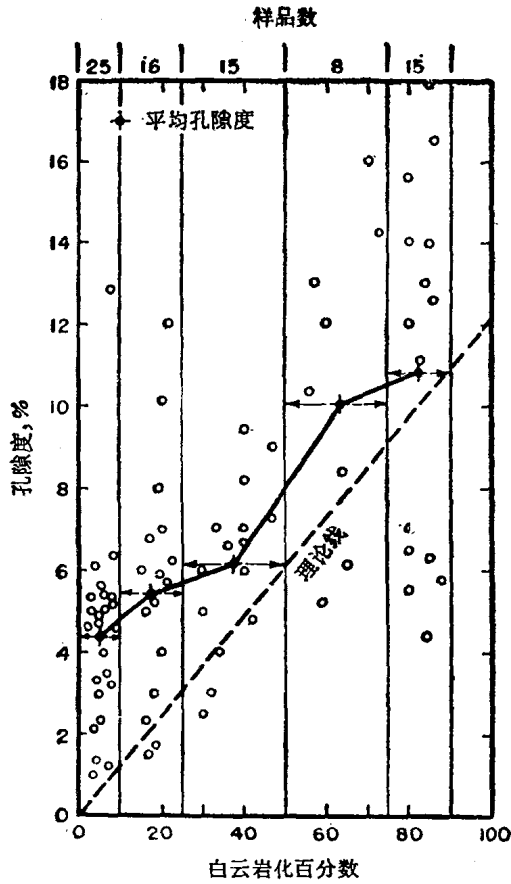


图1 伊朗阿斯马里灰岩孔隙度与白云岩化程度的关系。^[61]

地理的研究。分析原生沉积环境(例如:盆地、陆棚、滩、礁、礁后、滨外滩、泻湖),对于识别孔隙特征及预测孔隙倾向会有很大帮助。

在许多碳酸盐岩油藏中,发现孔隙度与渗透率之间存在着某些对比关系,而孔隙度对渗透率的关系曲线的形状与位置主要决定于岩性。例如,在图4中表示出藻类碳酸盐岩及贝壳泥屑灰岩的孔隙度与渗透率之间的关系^[9]。资料由全直径岩心分析得到,渗透率是平行于层面的方向测得的。从图4可以推知藻类岩石具有较大及较好的连通孔道(主要为质点间的及(或)溶洞的)。泥屑灰岩含有由于淋滤造成的小的印模,并通过晶间孔隙而互相连通。根据肖奎特和特劳特^[9],在犹他及科罗拉多州伊斯梅油田的最好孔隙性及渗透性条带是在碳酸盐构成体中发现的,主要在具有良好原生孔隙度及渗透率的颗粒支撑藻类岩石中。然而,在构成体及伴生碳酸盐相中现有的孔隙则大多是由淋滤作用生成的^[9]。有些成岩作用,包括白云岩化及淋滤作用,也会形成具有最好孔隙度及渗透率的地带。在有些情况下孔隙由于粗晶方解石及干石膏充填空隙而遭到破坏。

另一个岩性影响碳酸盐岩孔隙度-渗透率关系的例子示于图5,显示晶间孔隙的白垩系爱德华兹灰岩。在一定孔隙度下,当结构从微粒到粗粒变化时,渗透率也随之增加。克拉泽^[10]也从得克萨斯西部艾伦堡格群(奥陶系)及某些二叠系碳酸盐地层的样品中注意到结构影响孔隙度-渗透率倾向的相似关系。

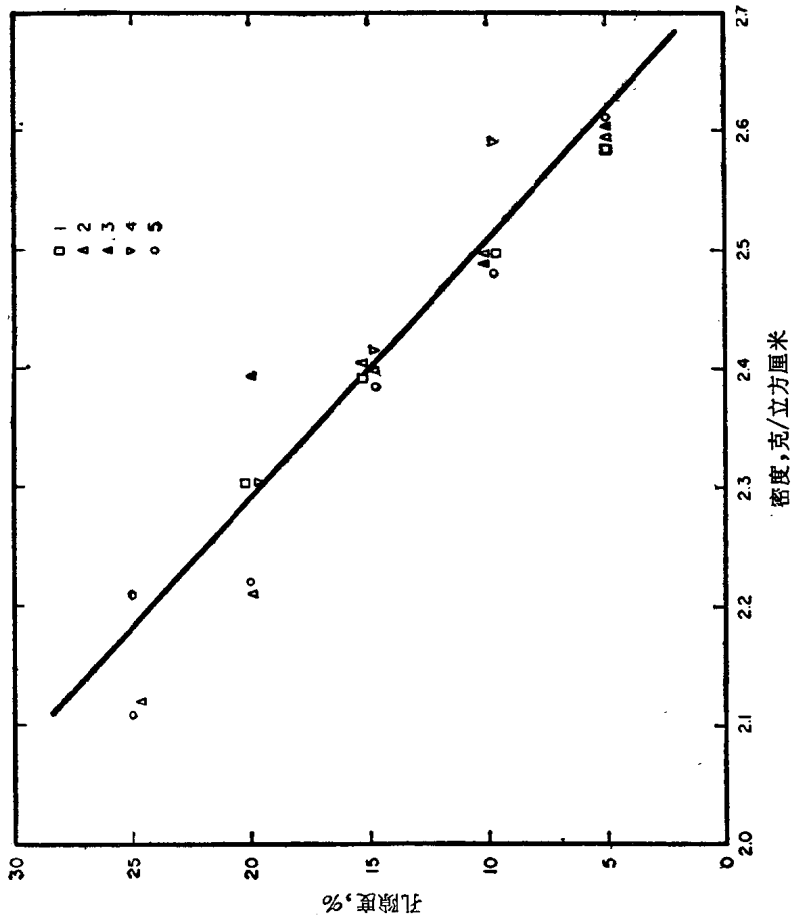


图2 岩石的密度与孔隙之间的关系 (引自阿热尔斯卡娅^[83], 125页)。
1. 页岩; 2. 灰岩; 3. 泥灰岩; 4. 白云岩; 5. 砂岩。

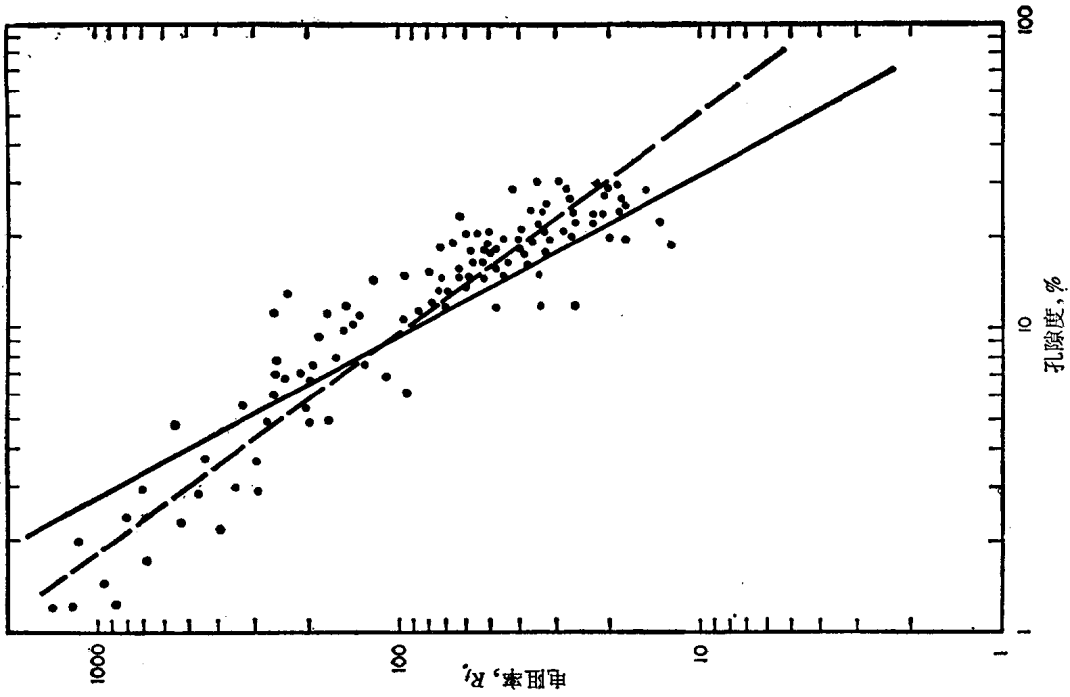


图3 苏联巴什基里亚, 库勒晓夫沉积灰岩的孔隙度与电阻率之间的关系 (根据费尔德曼及博亚罗^[87])。
实线——按阿尔奇公式计算; 虚线——用亨布尔公式计算。

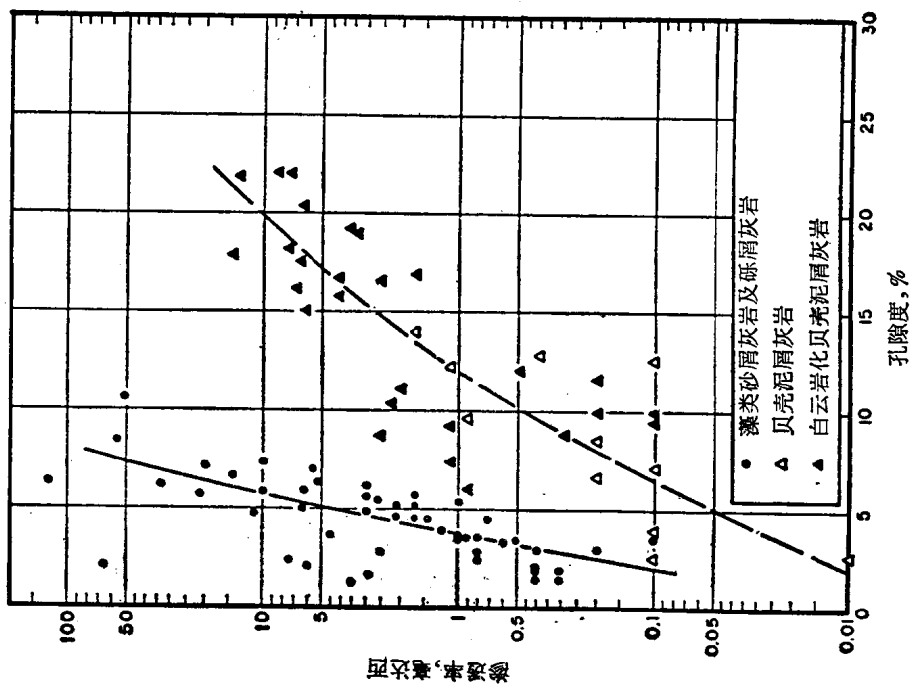


图 4 犹他及科罗拉多州伊斯梅油田, 宾夕法尼亚系碳酸盐岩的孔隙度与渗透率的关系^[10]。

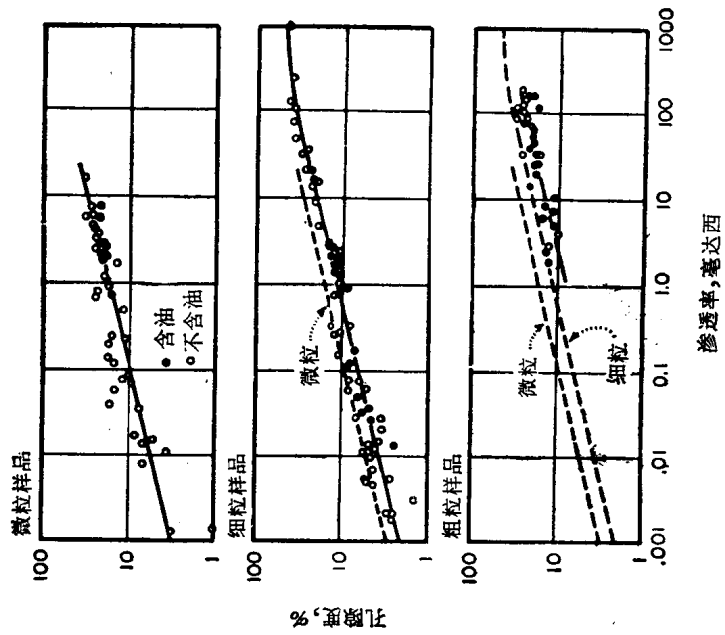


图 5 不同结构类型的白垩系爱德华兹灰岩孔隙度与渗透率之间的关系^[10]。

碳酸盐岩油藏的孔隙类型

根据孔隙的大小,碳酸盐岩的孔隙分类如下^[11]: (1) 洞穴(>2毫米), (2) 很粗(1.0—2.0毫米), (3) 粗(0.5—1.0毫米), (4) 中等(0.25—0.50毫米), (5) 细(0.1—0.25毫米), (6) 很细(由0.01—0.02毫米到0.1毫米), 及(7) 极细(<0.01—0.02毫米; 平均0.015毫米)。

岩石的空隙通常分为两大类: (a) 在石化前或石化时形成的原生空隙; 及(b) 石化后形成的次生空隙, 如溶解空隙及节理。

灰岩中的原生间隙包括:^[12,13] (1) 碎屑碳酸盐岩(鲕状岩, 介壳灰岩等), 各个组分质点间的空隙; (2) 在结晶质灰岩中单个晶粒之间的空隙及沿晶粒解理面的空隙; (3) 沿层面的空隙, 此类层面是由于沉积物质的差别, 以及由于晶体排列和大小的差别而形成的; 及(4) 无脊椎动物的骨骸及保护构造内部空隙, 以及藻类组织内部空隙。

碳酸盐岩中的次生间隙可以按如下分类^[12]: (1) 在固结的过程由于沉积物的收缩, 或由于矿物转化, 或地壳运动形成的裂缝; (2) 与形成及出现侵蚀面有关的溶解通道, 以及一般说来由于淋滤作用产生的溶解通道; (3) 由于矿物转化, 产生的晶粒之间的孔隙, 如白云岩化。

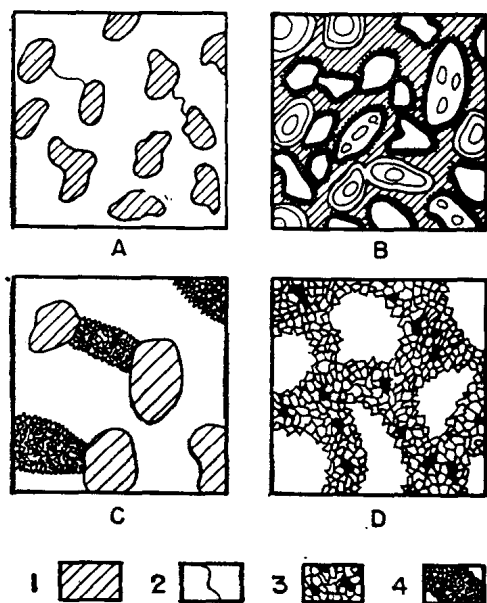


图6 碳酸盐岩中孔隙空间构造的四种类型^[11]。

1. 孔隙; 2. 连通孔道; 3. 粒间孔隙; 4. 连通支脉。

固结过程中, 由于沉积物在收缩形成的节理, 有时在分类中被归入原生空隙。此外, 产生孔隙的白云岩化, 可以是成岩作用的(在石化前或石化期间形成), 或成岩后生作用的(灰岩完全石化以后由于下行渗滤的雨水溶液或上升的热热水溶液形成)。后生白云岩的钙-镁比无论在垂直方向或水平方向, 均在短距离内有大的变化。

碳酸盐岩的孔隙空间构造曾由特奥多罗维奇^[11,13,14] 分成六个类型:

第一类型: 第一类型的孔隙空间是由孔隙及相当孤立近乎狭窄的连通孔道组成(图6A, 7A、B、C)。通常这种类型的连通孔隙的狭窄孔道(内径为0.01—0.005毫米)在薄片内是看不见的, 然而如果孔道直径较大, 可以在透明的薄片中发现。

第二类型: 第二类型孔隙空间的连通孔道就是孔隙空间本身的缩小部分。缩小部分逐渐变宽即为孔隙空间本身(图6B, 8, 9)。

第三类型: 第三类型构造的特征是孔隙由一些宽的, 但内部多细孔的孔道互相连通, 在薄片观察呈支脉状(图6C)。连通孔道偶尔由较粗孔隙构成, 此时渗透率将大为增加。这种类型的孔隙空间通常在白云岩中发现, 有时在白云岩化灰岩中也可见到。

第四类型: 第四类型孔隙空间构造的特征, 是孔隙系统分布在白云岩主体的颗粒或

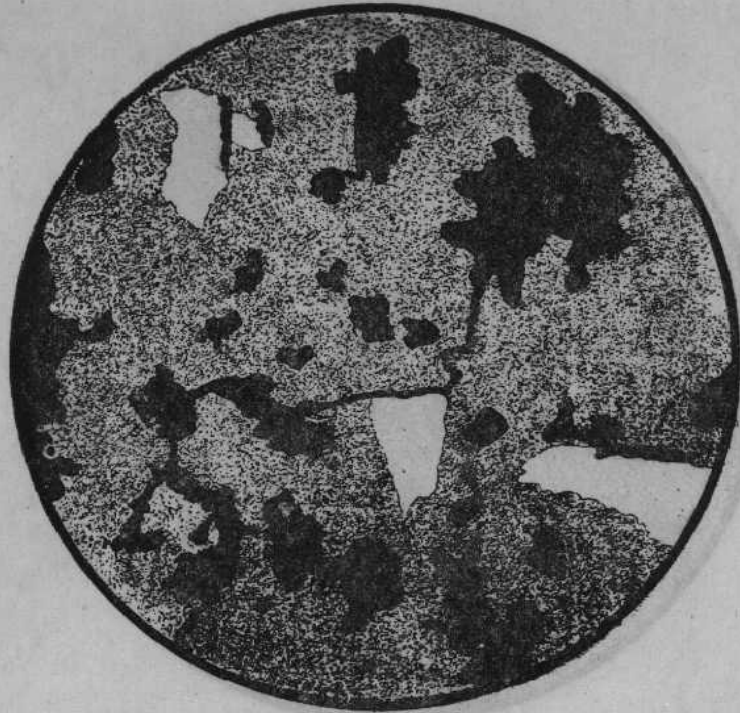


图 7* 第一类型孔隙空间构造：(A) 具有狭窄的（在显微镜下可在薄片内看到）连通孔道。采自伊希姆拜区东部大块下二叠系萨克马尔斯克阶（P₂带），很细粒的白云岩； $k=127$ 毫达西， $\times 42^{[11]}$ ，282 页。

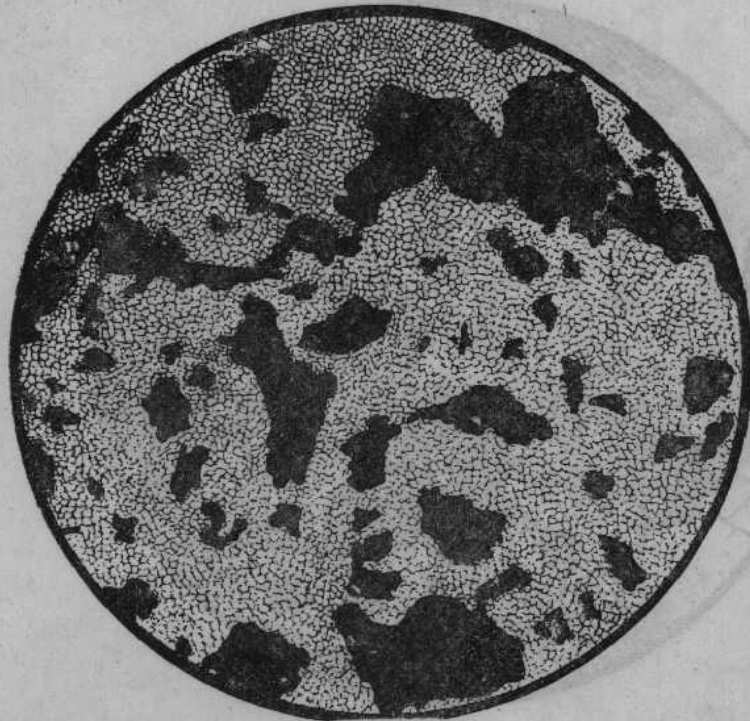


图 7(B) 同 (A)，但具有一些宽的连通孔道； $k=567$ 毫达西， $\times 42^{[11]}$ ，283 页。

* 图 7-10 在复制时 $\times 8/10$ 制版。——译者

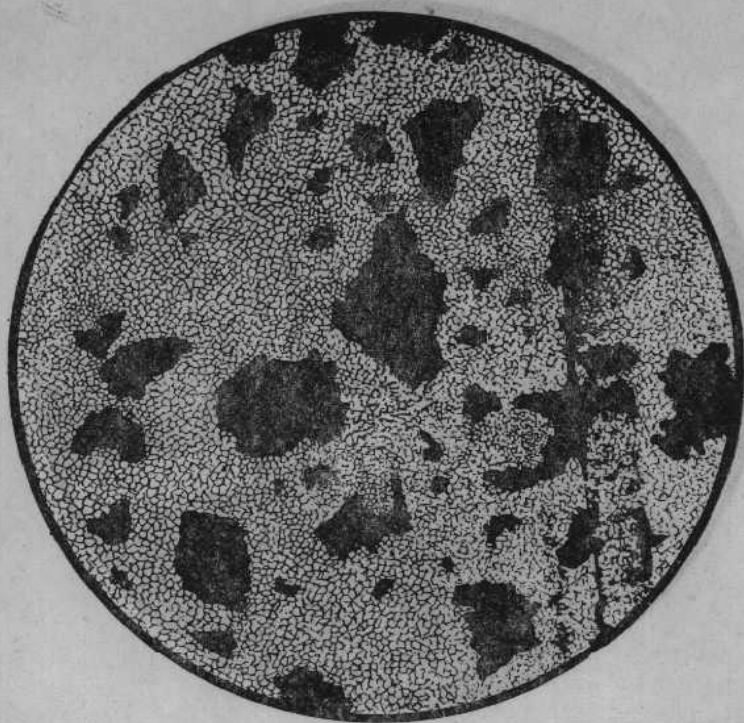


图7(C) 薄片内看不到连通孔道。采自伊希姆拜区南部大块下二叠系萨克马尔斯克阶 (P_1^s 带), 很细粒白云岩; $k = 567$ 毫达西, $\times 42^{[11]}$, 281 页。



图8 具有细孔隙的第二类型孔隙空间构造。采自伊希姆拜区东部大块下二叠系阿尔丁斯克阶 (P_1^a); 碎屑, 海百合-苔藓虫灰岩, $k = 230$ 毫达西, $\times 42^{[11]}$, 284 页。