

石油地质学基础理论丛书

油气储集层的 孔隙结构

罗蛰潭 王允诚 编著

科学出版社

石油地质学基础理论丛书

油气储集层的孔隙结构

罗蛰潭 王允诚 编著

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书力求通过较多的实例来论证地热条件对油气的控制作用, 以及地热研究在油气勘探与油气资源评价中的实际意义。

油气区的地热研究和一般地区有共性也有特殊性。在基本保持地热研究内容系统性介绍的前提下, 本书的主要篇幅与重点放在: (1) 油气区有一定特性的地热研究方法, 如热流、古地热、地温场数字模拟等; (2) 油气区各类地热资料因多方面条件干扰导致失真的原因分析, 以及如何取得可信的相应资料; (3) 不同地热研究内容在油气评价中的具体意义。

本书主要读者对象为石油工作者与地热工作者, 亦可供其他有关科研、教学等部门参考。

石油地质学基础理论丛书

地 热 与 石 油

汪缉安 熊亮萍 杨淑贞 著

责任编辑 周明鉴

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

*

1985年12月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1985年12月第一次印刷 印张: 5 1/4

印数: 0001—1,600 字数: 119,000

统一书号: 13031·3042

本社书号: 4772·13—14

定价: 1.30 元

前 言

油气储集层是石油地质、油气田勘探与开发中的一个主要研究对象。随着石油工业的发展,油气储集层的研究越来越显得重要,它不但决定油气储量的大小,而且直接控制油气井的产能及最终采收率。

在油气储集层的研究中孔隙结构是微观物理研究的核心。常规岩心分析只能获得一些宏观的统计资料,如孔隙度、渗透率和饱和度。非常规或特殊岩心分析就包括了毛管压力、润湿性和相渗透率,以及其他一些必须项目。油气储集层的孔隙结构属于特殊岩心分析的研究范畴。由于近年来对油气储集层孔隙结构的研究不断深入的结果,加深及丰富了对油气储集层的认识,深刻揭示了油气储集层的内部结构。对于充分发挥油气层的产能及尽可能提高油气采收率起到了积极的作用并已作出重要贡献。加强油气储层孔隙结构的研究无疑具有深远的理论意义及现实意义。

目前研究岩石孔隙结构最主要的方法是用测定毛管压力的方法来确定孔隙和喉道的定量特征,并与孔隙铸体的镜下鉴定及扫描电镜观察,构成不可分割的、具有内在联系的主要研究手段。从二十世纪三十年代起,国外就进行了该项研究,解决了许多现场提出的实际问题。五十年代曾掀起一个研究微观孔隙结构的高潮,涌现出许多新方法和资料解释的新理论。六十年代以后,逐步在资料应用上扩大了范围。从单纯解释孔分布、渗滤特征,逐步扩大到油气田勘探、开发、储量计算及油气采收率的领域中来。

我们国内有数以千计的石油地质工作者及油气田勘探与开发的工程师们需要应用这些资料。随着生产及理论上的需要,在七十年代出现了研究和应用岩石孔隙结构的高潮,取得了一大批有价值的研究成果。虽然在开始的时间上比国外落后了近二十年,但现今的大规模研究也逐步弥补了过去的不足,在某些领域内已经逐渐达到或接近国际水平。

国内外有关储层孔隙结构研究的论文十分丰富,这些文章分散在大量的地质、石油、物理和化学文献中。本书收集了大量这方面的理论和技术,按照先理论、后应用,先勘探、后开发的顺序,结合作者多年从事这方面研究的主要成果编写成为一本专题性的、内容广泛而具实用性的专著。

作者是从1972年开展这方面工作的,与各地质及石油部门建立了密切的联系,许多成果得到了他们的支持及应用,研究成果曾分别在四川、陕甘宁、华北、玉门、大庆、苏北、新疆等油气田及地质矿产部石油地质中心实验室讲学,得到了他们的支持与鼓励。在学院内也曾作为油层物理教材的一部分及研究生学习课程进行过讲授,经过几年的酝酿及不断修改,逐步形成了本书的系统。

作者希望这本书能对从事石油地质及油气田勘探与开发的地质工作人员和工程技术人员有所帮助。更主要的是希望读者能多提意见,使之能在广大群众的关怀及支持下逐步形成一门成熟的边缘学科。

限于作者的水平及所掌握的研究手段,错误或不当之处在所难免,希广大读者批评指正。

作 者

一九八三年七月

目 录

前言

第一章 岩石的主要物理性质	1
一、孔隙度.....	1
二、渗透率.....	5
三、孔隙度和渗透率的关系.....	8
四、饱和度.....	12
五、岩石的比表面.....	15
六、相渗透率.....	17
第二章 储集岩的孔隙类型和孔隙结构模型	21
一、孔隙结构的基本概念.....	21
二、砂岩储集岩的孔隙类型及孔隙结构特征.....	23
(一) 砂岩储集岩的孔隙类型.....	23
(二) 砂岩储集岩的孔隙和喉道.....	29
三、碳酸盐岩的孔隙类型及孔隙结构特征.....	31
(一) 碳酸盐岩的储集性与砂岩的比较.....	31
(二) 碳酸盐岩的孔隙类型.....	32
(三) 孔隙喉道及孔隙结构类型.....	37
四、储集岩的孔隙结构模型.....	40
(一) 毛细管束模型.....	40
(二) 管子网络模型.....	40
(三) 球形孔隙段节 (SPS) 模型.....	42
(四) 普通的段节 (GPS) 模型.....	43
五、我国各主要油气区孔隙空间结构研究的实际资料.....	43
第三章 储油(气)层毛细管压力的基本概念和测定方法	50
一、表面张力和表面能.....	50
(一) 流体的极性.....	51
(二) 温度和压力对表面张力的影响.....	51
(三) 吸附与表面张力.....	52
(四) 矿物表面不均一性的影响.....	52
二、润湿性.....	53
三、毛细管压力的基本概念.....	57
四、理想介质中的毛细管压力.....	59
五、饱和顺序对毛细管压力的影响.....	61
六、毛细管压力的测定方法.....	62
(一) 半渗透隔板法.....	63

(二) 离心机法	68
(三) 水银注入法	70
(四) 动力毛细管压力法	76
(五) 蒸气压力法	78
第四章 毛细管压力曲线的解释和应用	80
一、毛细管压力-饱和度曲线	80
二、毛管压力曲线的形态分析	81
三、毛细管压力用液柱高度表示的方法	82
四、储油层中的毛管压力-水饱和度关系	84
五、毛管压力曲线的定量特征	85
(一) 排驱压力	8
(二) 饱和度中值毛管压力	8
(三) 最小非饱和的孔隙体积百分数	8
六、平均毛管压力和“J”函数曲线	90
七、应用毛管压力曲线计算渗透率	92
八、应用毛管压力资料计算相渗透率	9
九、碳酸盐岩的毛管压力和孔喉宽度	10
十、应用毛管压力-饱和度曲线确定岩样的孔隙喉道大小和分布	10
十一、正态概率曲线及用图解法求特征值	109
十二、地质混合经验分布及用矩法确定特征值	114
十三、水银退出曲线和重新注入曲线	124
十四、应用毛管压力资料确定储油岩石的润湿性	129
十五、应用毛管压力曲线确定孔隙的表面积	132
十六、应用注入和退出曲线确定平均孔-喉体积比	133
十七、压汞资料的多元统计法	134
十八、实验研究中的若干问题	137
第五章 岩石孔隙空间的复制技术及其地质应用	140
一、概论	140
二、制备孔隙铸体的浸染剂	142
三、岩样准备及浸染剂注入方法	146
四、岩样孔隙铸体的制备	150
附录1 砂岩岩样的另一种制备方法 (Weinbrandt 和 Fatt 1969)	151
附录2 几种特殊的孔隙铸体技术	151
五、岩石孔隙铸体的地质应用	152
第六章 毛管力在油气勘探中的作用	157
一、找油中的工程概念	157
二、毛细管作用在石油运移和屏障中的论点	160
(一) 毛细管过滤作用	160
(二) 油气是从高能地区向低能地区流动	161
(三) 关于临界喉道的论述	161

三、毛管力在石油运移和聚集中的作用	162
(一) 石油的运移	162
(二) 石油的捕集	165
(三) 水动力的影响	166
(四) 计算参数的估计	167
(五) 小结	169
四、油田应用实例	169
(一) 海湾沙坝砂岩	169
(二) 河道砂岩	171
(三) 河流三角洲砂岩	173
(四) 水动力的地层圈闭	175
(五) 断层圈闭	176
四、在水湿碳酸盐岩中石油运移的最低条件	176
五、孔隙几何特征在勘探上的应用	180
六、二次烃类运移和捕集机理的总结	182
第七章 应用孔隙结构参数对储集岩分类和评价	198
一、砂岩储集岩的分类评价方法	198
(一) 按岩石表面结构和毛管压力特征的分类评价方法	198
(二) 根据砂岩的孔隙类型和毛管压力特征的分类评价方法	201
二、碳酸盐储集岩的分类评价方法	206
(一) Stout 的分类评价方法	206
(二) 按岩石表面结构和毛管压力特征的分类	210
(三) 根据孔隙结构与岩石类型相互关系的分类评价方法	213
(四) 成都地质学院储层组按岩石学特征和毛管压力参数的分类评价方法	215
(五) 小结	220
三、储集岩下限的确定方法	220
(一) 用孔隙度来划分储层下限	221
(二) 用渗透率来划分储层的下限	222
(三) 综合下限指标	223
(四) 根据储集岩的孔隙结构参数来划分储层下限	224
第八章 孔隙结构和石油采收率	226
一、毛管力和石油采收率	226
二、残余油在孔隙内的微观捕集机理	227
(一) 各相流体在孔隙内的微观捕集机理	228
(二) 残油特征	229
(三) 改善石油采收率需要考虑的因素	230
三、空气-油的吸入试验法	231
四、结构难度和石油采收率	233
五、某些砂岩储集岩的孔隙结构和石油采收率	236
六、碳酸盐储集岩的孔隙结构对石油采收率的影响	240

七、毛细管数码、孔分布与驱油效率的关系	244
八、孔隙结构对水驱油机理的影响	247
九、孔隙结构系数和驱油效率	248
十、均质系数与驱油效率	249
十一、小结	251
参考文献	252
图版	256

第一章 岩石的主要物理性质

本章主要讨论构成储油(气)层的沉积岩的物理性质。这些物理性质是评价储油(气)层必不可少的基础资料。这里并不研究这些物理性质的测定方法,主要从概念上、以及受各种地质环境的影响方面来阐述,也附带引用一些统计资料和实用的计算方法,以供实际中参考。

一、孔隙度

沉积岩要成为储油(气)层,必须在其颗粒之间有石油及天然气能聚集的空穴或间隙。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。在石油工业中,更常用的概念是由如 Musket (1949)所指出的:“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”。显然,能够容纳液体的孔隙需要具有相互连通性,即液体能由一个孔隙运移到另一个孔隙。在某些著作中,将相互连通的孔隙体积与岩石总体积之比称为岩石的连通孔隙度。

岩石的孔隙度是衡量岩石能够储集液体的能力的参数。 Levorsen (1966) 发表的统计资料表明: 从全世界已发现的大量油田来看,孔隙度的大小是油田分类评价的一个重要参数(见表 1-1)。

表 1-1 Levorsen (1966) 对储集岩的分类评价

评 价	孔隙度(%)	渗透率(毫达西)
差	5—10	<1
中等	10—15	1—10
好	15—20	10—100
很好	20—25	100—1000

我国的砂岩储集层的孔隙度、渗透率范围大致符合表 1-1 的分类评价。碳酸盐岩的储集层由于存在裂缝、溶洞等次生作用的强烈影响,故用上表来评价往往不会取得满意的结果。

从沉积岩石学的研究来看,决定砂岩孔隙度的主要因素是碎屑颗粒的大小以及其分选程度的好坏。

分选系数(Φ 值)对孔隙度的影响曾由 Beard 和 Weyl (1973) 提出了一个直观的影响图(图 1-1)。他们将分选系数分成六等。由图可见,颗粒分选越差,杂基的较细小的颗粒充填并堵塞了孔洞和喉道,不仅可以降低孔隙度,而且也降低了渗透率。

如果将颗粒直径的因素也考虑在内,则可以分成两种不同的情况。当分选系数(Φ 值)小于 2 时,各种粒径的砂岩孔隙度均随分选系数增大而迅速下降;当分选系数(Φ 值)

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,但其下降的程度较缓。

显然,理论上将砂岩看成球体,并认为孔隙度和粒径无关的看法,对于实际砂岩是不适用的。

从我国的砂岩油藏来看,作为良好的储油岩主要是中粒和细粒砂岩。粗砂岩和粉砂岩大都是较差的储集岩。地质矿产部石油地质中心实验室曾对酒泉盆地白杨河砂群作过粒度中值和孔隙度关系的研究,其结果列于表1-2。从表中可见,该层段的孔隙度随粒度中值的增大而增大。

砂粒的磨圆度无疑也会对孔隙度产生直接的影响。日本的小松直幹(1978)指出,据大量实际资料来看,如果是磨圆度好的砂岩,其分选也好,孔隙度也较好。但是,砂粒的磨圆度对孔隙的形状有很大的影响,特别是对孔隙与孔隙之间的连通喉道有明显的作用,因此,应当同时考虑磨圆度同孔隙度、渗透率以及毛细管压力的相互关系。

砂岩中的胶结物总是使岩石孔隙度和渗透率降低的因素,随着胶结物成分的变化,含量的增加以及胶结类型的不同,砂岩中的粒间孔隙将变为充填残留孔隙或充填物内孔隙,使孔隙度、渗透率急剧变小。

我国砂岩油田大都是泥质胶结,少数是灰质胶结。一般来说,岩石的孔隙度和渗透率均随胶结物的含量增加而降低。

除了上述影响孔隙度的因素而外,压实作用也会使孔隙度降低。对于在成岩作用期已经固结的岩石,随着上覆地层的加厚,压力与地层温度也逐渐增加,压实作用随之加强,促使岩石颗粒排列得更趋紧密,甚至会产生镶嵌与压溶现象,可使孔隙度降低。四川盆地香溪群是一个典型的例子。该层为石英砂岩,细一中粒,分选好,泥质胶结,深度超过3,000米。但由于石英次生加大现象普遍,使颗粒紧密接触,大多呈镶嵌结构,使孔隙度与石英次生加大程度成反比。

表1-2 酒泉盆地白杨河群砂岩的粒度中值与孔隙度的关系¹⁾

名 称	粉 砂 岩	细—中粒砂岩	粗 砂 岩
粒度中值(毫米)	<0.1	0.1—0.25	>0.25
孔隙度(%)	7—13	10—25	14—20

1) 地质矿产部石油地质中心实验室, 1978。

有许多统计资料都说明砂岩的孔隙度随深度增加而降低,不同地区有不同的关系式。

近年来,国外为了开发深部低渗透油(气)田,对 3,000 米以下的致密砂岩重新进行研究。一个新的认识是,砂岩在成岩中期(埋藏深度已很深)常可产生次生作用,并形成次生孔隙。这些次生孔隙是由于溶解了早期交代的矿物,或者是岩石的破碎和收缩作用形成的。

石灰岩则与砂岩不同,因为所有的石灰岩基本上是由溶液沉淀出的沉积。石灰岩往往是有有机物质的残骸,或者是含有海洋有机体的碳酸钾的沉积。某些石灰岩是由圆形颗粒的“鲕粒”物质组成的,有时碳酸钾盐类中含有贝壳的残骸。当石灰岩中钙盐部分为镁所代替时,就形成白云岩。

由于沉积环境的不同,碳酸盐岩除了“原生孔隙”而外,许多孔隙是在溶解过程中形成的。一般来说,碳酸盐岩的孔隙仍然是容纳油气的空间,而裂缝则主要形成高渗透带。

例如,伊朗第三系阿斯玛里灰岩具有非常发育的构造裂缝系统。这个构造裂缝系统提供了流体的通道,并使石油从只具有低流动能力的非裂缝孔隙中流到井底,形成世界上单井产量最高的产油区。阿斯玛里石灰岩厚 400—600 米,不同层段的产油气情况是不同的,可以分成三种类型(表 1-3)。

表 1-3 伊朗阿斯玛里灰岩的孔隙度、渗透率与生产能力的关系

产层类别	孔隙度(%)	渗透率(毫达西)	含水饱和度(%)	厚度(%)
好生产层	>8	>1	10—25	<20
差生产层	5—8	0.1—1	25—70	<20
非生产层	<5	<0.1	60—100	>60

我国所发现的碳酸盐岩油气田大都有类似情况。在整个厚度上,好的生产层(孔隙度较大的区段)一般只占 5—20%,而非生产层的比例很高。

作为油气储集层,除生物格架碳酸盐岩外,颗粒碳酸盐岩的孔隙发育情况与砂岩相似,亦受颗粒大小、分选、形状及胶结物含量等因素的影响。

对于结晶质石灰岩和白云岩,井波和夫(1977)曾寻找粒径同孔隙度的关系。他的实验结果如图 1-2 所示。图中指出,结晶质石灰岩当粒径在 0.3 毫米以上时,在双对数坐标上,孔隙度(ϕ)和粒径(d)呈直线关系,并可以用下式表示。

$$\phi = 0.215d^{0.835} \quad (1-1)$$

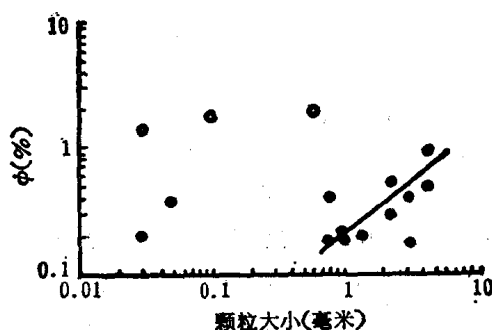


图 1-2 孔隙度与粒径关系图

黑点表示结晶质石灰岩, 白圈表示白云岩(井波和夫, 1977)

式中 ϕ 为孔隙度(%), d 为粒径(毫米)。

在白云岩中则没有见到有什么关系。

碳酸盐岩成岩后的溶蚀作用常常使孔隙度发生面目全非的变化。现有的资料表明,除泥质碳酸盐岩外,很难笼统地表明地下水的溶蚀作用对石灰岩和白云岩的影响。现在大都只能认识到在不同的地质条件下,所反映的溶蚀特点有所不同。溶蚀作用一般可以使岩石中裂隙扩大,并形成洞穴孔隙,它可以使碳酸盐岩的孔隙度增加。虽然在溶解的同时还要析出各种沉淀来缩小孔隙,但是比较多的例子表明,沉淀物质往往不能把全部孔隙充满,或多或少会有残留孔隙。例如我国华北油田雾迷山组的藻白云岩即为一例。

影响碳酸盐岩孔隙的另一个重要因素是构造裂缝孔隙的发育,微细的构造裂缝孔隙的发育与岩性有比较重要的关系。岩性越脆,则裂缝孔隙越发育。白云岩在应力作用下比石灰岩发育有更多的裂缝;低的粒间孔隙或次生变质作用大的岩石,其裂缝孔隙也发育,重结晶、白云岩化、硫酸盐化、硅化作用都可增加岩石的裂缝孔隙。

在影响储集层的性质诸因素中裂缝起了许多作用,它们可改变孔隙度或渗透率、或两者都可改变。假若裂缝被次生矿物填充,就会阻碍流体的流动。然而,在有些岩层中,即使基块的孔隙度很低,裂缝能增加其孔隙容积,从而能采得大量油气。在另外一些岩层中,裂缝虽然不会实质上增加总孔隙的容积,但它们能够连接原来孤立的孔隙空间。因此,裂缝既能增加储集层的孔隙度,又能使孤立的基块孔隙与井眼相沟通,无疑,它的确可以提高储集性能。

裂缝的宽度、面积、间距、缝面粗糙度是控制裂缝孔隙度的主要因素。一般情况下的裂缝孔隙度是很低的,由 <0.05 到 6% 。如果一立方英尺的六面都有 0.04 英寸(1 毫米)宽的未填充裂缝,则其孔隙度还不到 2% 。

此外,裂缝孔隙的发育与背斜构造有重要关系。这在四川盆地最为明显。在不同类型的构造上,裂缝具有不同的情况。例如,在褶皱区的背斜上,碳酸盐岩裂缝强度的分布与背斜形态有关。梳状背斜沿轴部裂缝孔隙发育,构造两端亦发育有较多的裂缝孔隙;箱状背斜情况则不同,裂缝孔隙主要发育在背斜顶部与陡翼的枢纽带部分及背斜的端部。此外,这两种背斜构造的轴线转折部分的外侧,亦发育有较多的裂缝孔隙。总之,裂缝是发育在倾斜变化率变化最大的部位。

Murray (1968) 发展了一种适用于褶皱岩层的裂缝几何学方法。假定褶曲层的外层中有张裂缝,那么裂缝孔隙度与层厚和曲率的乘积成正比,即:

$$\phi_f = \frac{T}{2R} = \frac{T}{2} \frac{d^2 Z}{dx^2} \quad (1-2)$$

式中 ϕ_f 为裂缝孔隙度, T 为层厚, R 为曲率半径, $\frac{d^2 Z}{dx^2}$ 为曲率 ($\frac{dZ}{dx}$ 为倾角)。这个方程特别有用,因为在计算时可以不考虑裂缝的间距。

在研究岩心中的裂缝时,把岩心从岩心筒取出应该十分小心,要把所有有关岩心定向的资料记录下来。如果能把整个岩心洗净并沿着平行于岩心轴向的几个切口切成岩石薄片,这样就能更好地观察裂缝。极小的裂缝可以用染色塑料的铸体技术、X射线技术或荧光染色渗入法来探查。

不过,从定量上来研究各种影响孔隙度的因素,对于碳酸盐岩来说还远远没有实现。

二、渗透率

如果流体 100% 饱和多孔介质的连通孔隙度, 此时流体通过互相连通的孔隙或者裂缝网的能力, 称为该孔隙介质的绝对渗透率。绝对渗透率可以用达西定律求得, 但达西定律并不描述个别孔隙的流动或孔隙沟道的流动。达西定律只是一种大量孔隙沟道中流动特征的统计测定 (Smith, 1966)。

从岩石学的早期研究中, 发现影响孔隙度的地质因素也直接影响孔隙系统的绝对渗透率。早期的研究就发现渗透率同孔隙度、颗粒粒径、颗粒的排列方式等关系密切。

小松直幹 (1978) 概括了早期的研究, 指出一些学者已经提出了若干关系式, 即:

$$K = Cd^2/K_s \quad (1899) \quad (1-3)$$

$$K = Cd^2 \left[\frac{\phi - 0.13}{(1 - \phi)^{1/2}} \right]^2 \quad (1925) \quad (1-4)$$

$$K = Cd^2 \phi^{3.31} \quad (1925) \quad (1-5)$$

$$K = \frac{\phi^3}{C_K s_v^2 (1 - \phi)^2} \quad (1927) \quad (1-6)$$

式中 K 为渗透率, C 为常数, d 为粒径, K_s 为有关排列的常数, ϕ 为孔隙度, s_v 为单位量中所包含颗粒的表面积, C_K 为 Kozeny 常数。

在渗透率受粒度、分选、排列、形状、磨圆度、矿物组成等各种影响的研究方面, 还有不少地质工作者的研究值得推荐。

Krumbein 和 Monk (1942) 提出用粒径资料来确定渗透率, 他得出下列计算式:

$$K = Cd^2 e^{-\alpha\sigma} \quad (1-7)$$

式中 C 为常数, α 为常数 (对于非胶结砂子为 1.35), σ 为颗粒的标准差, 其它符号同前。

小松直幹进一步整理了 Beard 和 Weyl (1973) 的资料, 得出渗透率与分选系数 S_o 同粒径中值 (Md_ϕ) 之间有确定的关系 (见图 1-3, 1-4)。

由图 1-3 可见, 如果是相同的分选系数, 则渗透率的对数同粒径中值 (Md_ϕ) 成直线关系。

图 1-4 是分选系数同渗透率的关系。在同样的粒径中值时, 渗透率的对数同 S_o 成多段直线关系。从好的分选到中等分选时, 渗透率下降很陡。而分选很坏时, 渗透率的下降就缓慢了。

Hsu (1977) 对美国加利福尼亚文吐拉油田的研究指出: 在岩石学中影响渗透率的主要因素应当是粒径和分选系数。

从岩石学中研究各种碳酸盐岩的渗透率是比较少的。碳酸盐岩由于它的极不均一性, 从薄片研究中研究渗透率几乎没有代表性。比较有代表性的资料是从全直径岩心分析中得到的。

对于结晶质石灰岩和白云岩, 井波和夫 (1977) 曾经作了一些渗透率和颗粒大小的关系研究, 并得到了关系曲线 (图 1-5)。

从图 1-5 中可以看出, 结晶质石灰岩的粒径在 0.5 毫米以上时, 随粒径增大渗透率也有增大的趋势, 其它则没有明显的关系。

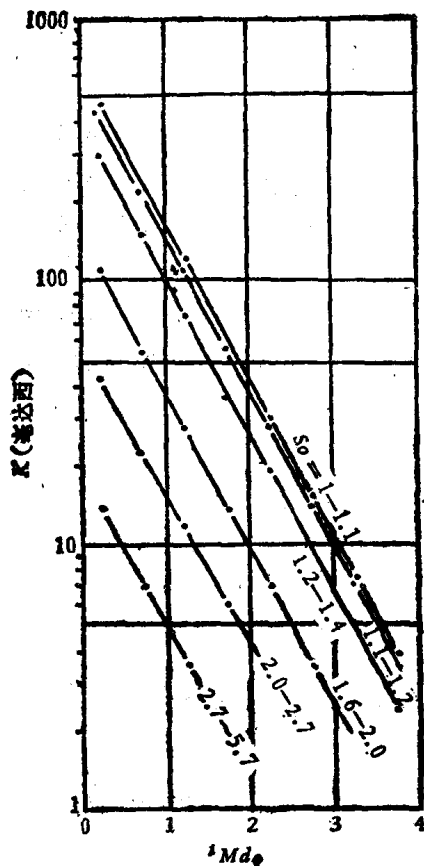


图 1-3 分选一定时,粒径中值与渗透率的关系
(Beard 和 Weyl, 1973)

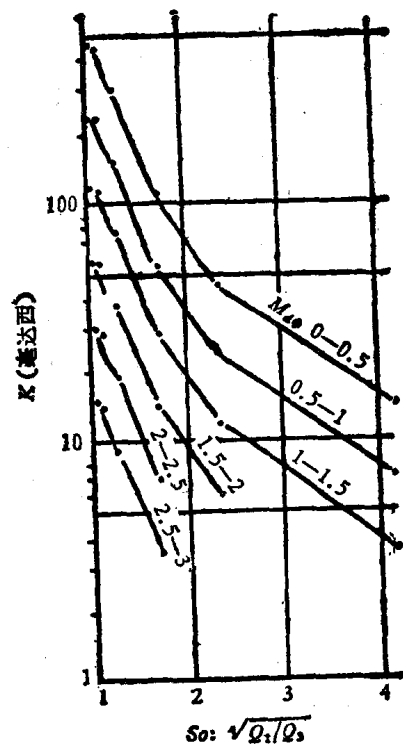


图 1-4 颗粒中值一定时,分选系数与渗透率的关系
(Beard 和 Weyl, 1973)

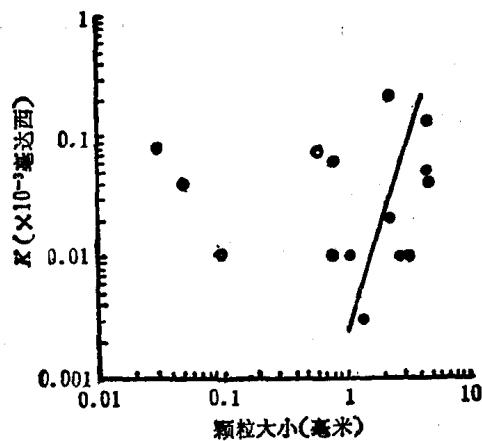


图 1-5 渗透率和粒径之间的关系
黑点代表结晶质石灰岩,白圈代表白云岩(井波和夫,1977)

从碳酸盐岩孔隙空间特征确定渗透率的工作, Aschenbrenner 和 Chilingar (1960) 曾探讨过 Teodorovich (1943) 提出的碳酸盐岩孔隙空间特征与渗透率关系的岩相学方法,当碳酸盐岩的渗透率不能在实验室中直接测定时,可用这个方法进行计算。根据 Teodorovich

(1943) 的研究,灰岩和白云岩的渗透率可以从一套经验系数中选定若干数值,然后将这些系数相乘即可得出渗透率值(毫达西)。亦即:

$$K = A \times B \times C \times D_1 \times D_2 \times D_3 \times E \quad (1-8)$$

或者简化成

$$K = A \times B \times C \times D_1 \quad (1-9)$$

式中 K 为渗透率(毫达西), A 为孔隙空间类型的经验系数, B 为有效孔隙度的经验系数, C 为孔隙大小的经验系数, D_1 为孔隙形状的经验系数, D_2 为胶结类型及数量的经验系数, D_3 为孔隙聚集程度的经验系数, E 为孔隙中及孔隙连通通道内壁光滑度的经验系数。

Aschenbrenner 和 Chilingar (1960) 各自测量并计算了大块碳酸盐岩样品的渗透率。他们的结果与 Teodorovich (1943) 所发表的结果有良好的一致性;在计算的与测量的渗透率之间只有 10% 的平均误差。

在定量描述砂岩和碳酸盐岩的孔隙空间结构特征方面, Percz-Rosales (1969) 提出了一种简单而有效的方法。此项技术是将一种网格重叠在岩石表面的显微照片上,由此可以确定具有实验价值各项参数的数值,如比面,孔隙宽度及颗粒厚度。在可以应用公式 1-6 的情况下,则可获得绝对渗透率。

$$K = CL^2 n^2 / 4N^3 c^2 m^2 \quad (1-10)$$

式中 C 为比例常数, N 为网格的结点数, n 为孔隙面积内的网格结点数, L 为网格线的总长度, c 为网格线与孔隙周界的交点数目。

但是,必须指出,上述方法仅适用于均质地层。

在碳酸盐岩储集层中,如何估价裂缝的渗透率是一个重要的问题。Parsons (1966) 所提出的计算式具有一定的代表性。他提出裂缝岩层系统总的渗透率如下式:

$$K_{tr} = K_r + \frac{W_a^3 \cos^2 \alpha}{12A} + \frac{W_b^3 \cos^2 \beta}{12B} \quad (1-11)$$

式中 K_{tr} 为总系统的渗透率, K_r 为无裂缝岩块的渗透率, W_a 、 W_b 为在 a 、 b 等组中裂缝的宽度, α 、 β 为代表 a 、 b 等裂缝组之间的角度,以及整个压力梯度, A 、 B 为裂缝间距(裂缝在 a 、 b 等组的裂缝之间的垂直距离)。

Murray (1968) 则是根据裂缝渗透率和孔隙度是层厚 (T) 和曲率 (d^2Z/dx^2) 的函数为出发点的,他提出在具有垂直于层理和平行于褶皱轴的张裂缝的褶皱层中,假定裂缝间距为 15 厘米,渗透率用毫达西表示时,其计算式为

$$K = 4.9 \times 10^{11} \left(T \frac{d^2Z}{dx^2} \right)^4 \quad (1-12)$$

表 1-4 渗透率计算的实例表 (Murray, 1968)

$T = 5$ 英尺		$T = 10$ 英尺	
$\frac{d^2Z}{dx^2} (\times 10^3)$	K (毫达西)	$\frac{d^2Z}{dx^2} (\times 10^3)$	K (毫达西)
1	0.06	1	0.49
2	0.49	2	3.92
4	3.92	4	31.20
6	13.20	6	106.00

根据式 1-12, Murray 还给出了渗透率值的附表(表 1-4)。

三、孔隙度和渗透率的关系

从上面单独描述孔隙度和渗透率的影响因素可以看出它们基本上是相同的,大量资

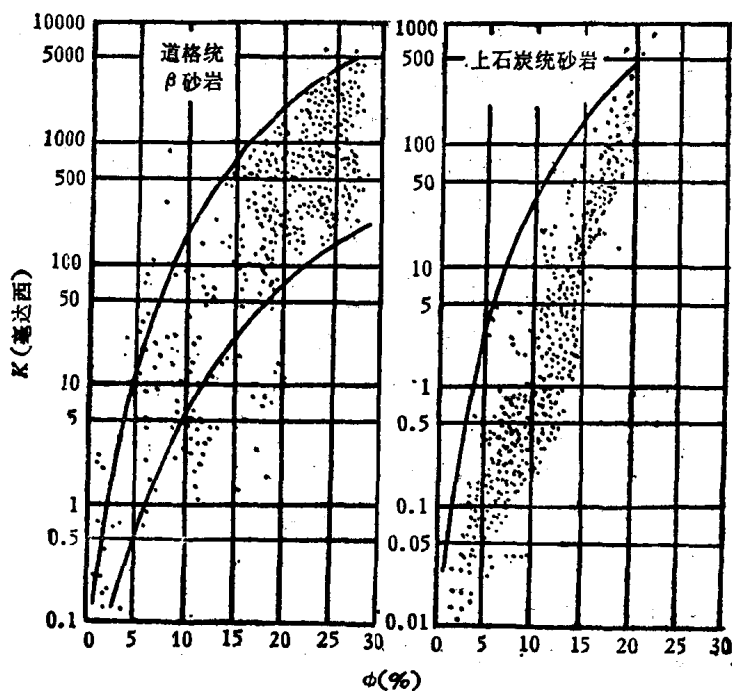


图 1-6 渗透率对孔隙度的交会图

左图为道格统 β 砂岩 右图为上石炭统砂岩 (Füchtbauer, 1963)

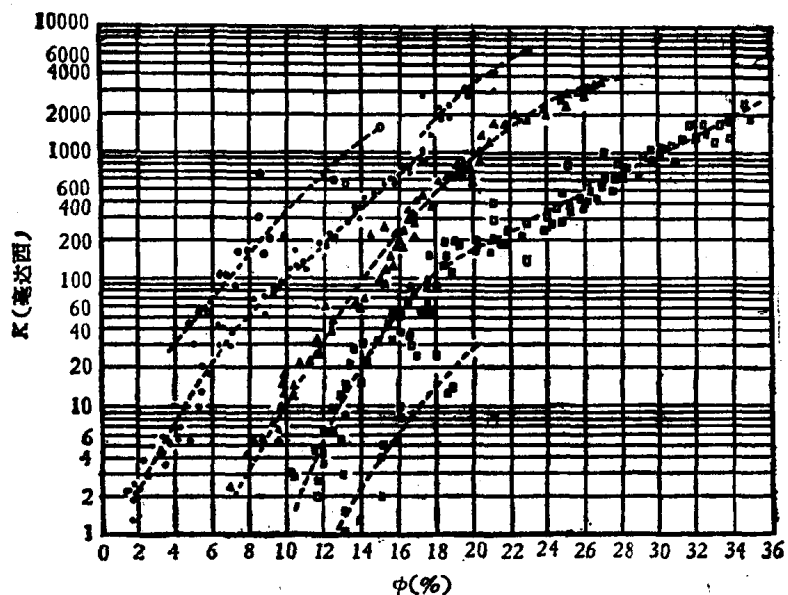


图 1-7 不同粒径的孔隙度和渗透率的关系图

1.粗的和十分粗的颗粒 2.粗的和中等的颗粒 3.细颗粒 4.淤泥 5.粘土
(Chilingarian 和 Wolf, 1964)

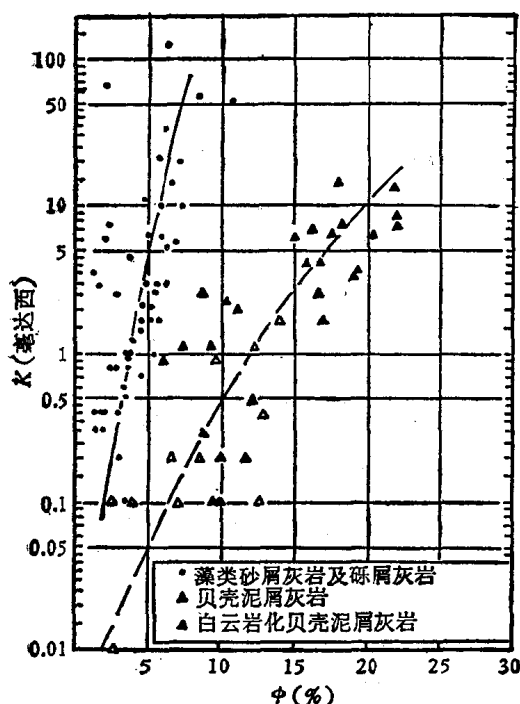


图 1-8 犹他及科罗拉多州伊斯梅油田宾夕法尼亚系碳酸盐岩的孔隙度与渗透率之间的关系 (Choquette 和 Traut, 1963)

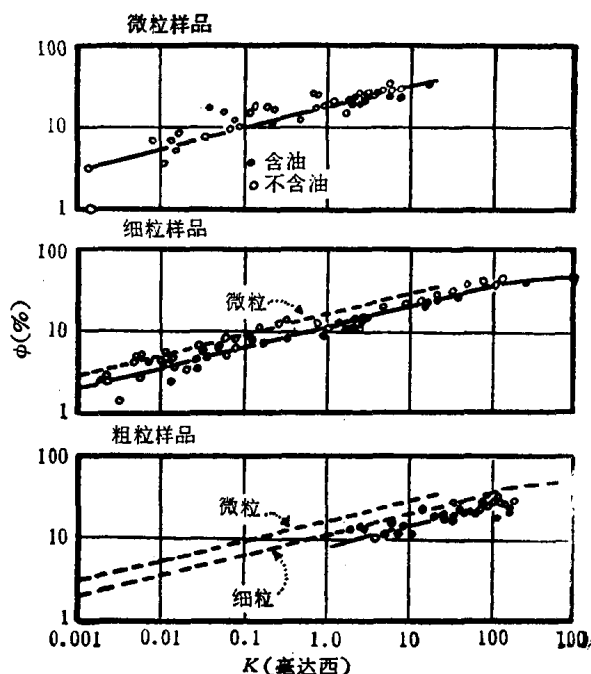


图 1-9 不同结构类型的白垩系爱德华兹灰岩孔隙度与渗透率之间的关系 (Craze, 1950)

料表明;在孔隙度和渗透率之间具有很好的相关关系。

Füchtbauer (1967) 对砂岩储集层作了大量的统计,证明了孔隙度和渗透率之间有很好的相关关系(图 1-6)。

Chilingarian 和 Wolf (1964)提出了各种不同颗粒直径的砂子的渗透率同孔隙度的关系(图 1-7)。图中表明随着粒径变小,在同样的孔隙度下,渗透率要减小。对于每一种粒径的砂子,随着孔隙度的增大,渗透率也相应地增大。

类似这种统计研究 Engelhardt (1951) 在孔隙度、渗透率与粒径之间的关系方面发表了许多定量的资料。其关系大都类似。

为什么砂岩的渗透率变化要比孔隙度的变化大得多? 似乎有两个原因。已知孔隙度既不限制砂岩孔隙系统壁上小规模粗糙度所给予流体的拖曳作用,也不限制砂岩内两点之间流体必须流经的长度。这两者或两者之一的变化均能改变渗透率而不改变孔隙度。

亦即: 如果引入粗糙度和迂曲度的概念,则渗透率比孔隙度变化更大的原因就好理解了。实质上,就会出现同样的孔隙度而具有不同的渗透率以及孔隙度变化较小而渗透率变化很大的情况。

在许多碳酸盐岩油藏中,亦发现孔隙度与渗透率之间存在着某种对比关系,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 1-8 中表示出藻类碳酸盐岩及贝壳泥屑灰岩的孔隙度和渗透率之间的关系。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。

另一个岩性影响碳酸盐岩孔隙度-渗透率关系的例子见图 1-9。图中显示出晶间孔隙的白垩系爱德华兹灰岩,在一定的孔隙度下,当结晶从微粒到粗粒变化时,渗透率也随