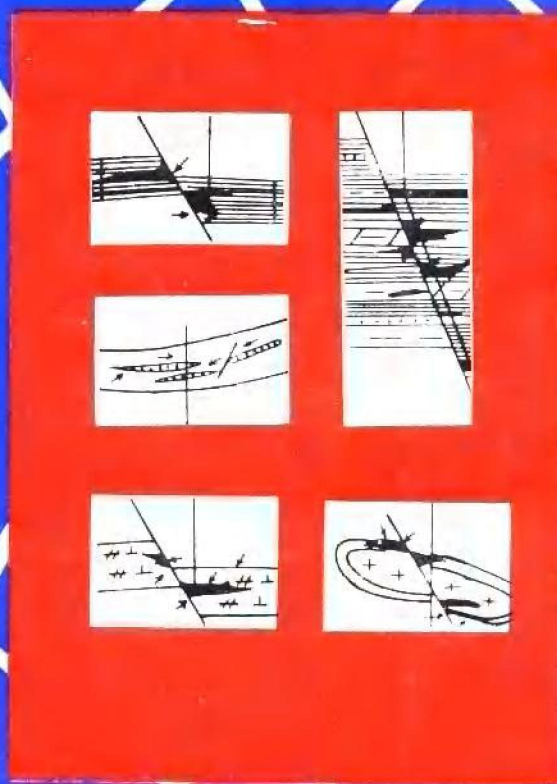


高等学校教学用书

戴启德 纪友亮主编

油气储层地质学



石油大学出版社

北京)

0.2

123890
P618.130.2
125

高等学校教学用书

油气储层地质学

戴启德 纪友亮主编

SUJOS/14



石油0117359

石油大学出版社

内容提要

本书是为石油高等院校地质专业本科生和研究生编写的《油气储层地质学》教材,本书深入浅出地对储层的沉积学特征、成岩作用,孔隙微观结构,储层非均质性,敏感性,储层描述技术、综合评价及测试技术做了较系统的论述,本书还引用了大量国内外近期研究成果,反映了当前储层地质研究领域中的新进展,新技术、新方法。

本书不仅可作为教材使用,还可供石油地质勘探,石油工程,应用地球物理等专业技术人员参考。

油气储层地质学

戴启德 纪友亮 主编

*

石油大学出版社出版发行

(山东省东营市)

新华书店经销

肥城印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/16 12.125 印张 310 千字

1996年8月第1版 1966年8月第1次印刷

印数 1—1000 册

ISBN 7-5636-0762-5/TE·142

定价:9.90 元

前 言

储层地质学是综合利用地质、物探、测井、钻井及试油等资料研究储集层的学科,是20世纪80年代以来,随着储层研究的不断发展,而逐渐形成并仍在发展的一门相对独立的分支学科。近年来各石油高校相继为研究生及本科生开设了《储层地质学》课程。但到目前为止,国内尚未有公开出版的储层地质学教材。虽然关于储层研究方面的文章不少,但都是一些具体实例研究和方法研究,没有形成一套较系统的储层地质学教学及研究体系。为了满足石油大学《储层地质学》教学需要,1991年石油大学石油地质教研室编写了《油气储层地质学》教材,校内铅印出版。

1992年4月中国石油天然气总公司高校教学指导委员会基础地质学科组在石油大学(华东)召开教材会议,决定由石油大学戴启德、纪友亮等编写适合于石油高校本科生教学的《油气储层地质学》教材。该教材编写组成员广泛听取了有关专家、学者,及大学生、研究生对石油大学校内铅印教材《油气储层地质学》的意见和建议,又在收集了大量国内外最新资料和文献的基础上,进行了认真修改,充实,终于编成了这本《油气储层地质学》教材。

关于《油气储层地质学》所应包括的内容,各专家和学者意见不尽统一,现根据石油大学石油地质教研室近年来的教学和科研的实践,考虑到与其他课程内容上的衔接,本书编写了绪论、储集层基本性质、储层的沉积学特征、储层的成岩演化及其模型、储层的微观孔隙结构、储层的非均质性研究、储层的敏感性,储层的描述与储层地质模型的建立、储层综合分类及评价、储层实验测试技术等九章内容。教材编写组成员的具体分工如下:

戴启德:绪论、第一、三章

纪友亮:第二、三、四、八、九章

徐樟有:第五、七章

全书由戴启德、纪友亮统稿。

在编写过程中,赵微林教授、吴元燕教授、郑浚茂教授、薛叔浩教授、方少仙教授、陈丽华教授等提出了宝贵的建议,并受到石油天然气总公司和石油大学领导的关怀支持。在此深表谢意。

本教材是在教学、科研的空余时间和假期编写的,由于时间仓促,加之编者水平有限,谬误之处在所难免,敬希专家、老师和同志们不吝指正。

编 者

1995.5.10

目 录

绪 论	1
第一章 储集层的基本性质	2
第一节 储集层的概念及分类	2
一、储集层的概念	2
二、储集层的分类	2
第二节 储集岩的孔隙性	4
一、孔隙空间的大小	4
二、孔隙度和裂隙率	6
第三节 储集岩的渗透性	7
一、绝对渗透率	7
二、有效渗透率和相对渗透率	9
第四节 储集岩的流体饱和度	10
一、流体饱和度的概念	10
二、有效含油饱和度与剩余油饱和度	10
第二章 储层的沉积学特征	12
第一节 碎屑岩储层的沉积学特征	12
一、碎屑岩储层的岩石类型	12
二、碎屑岩储层的储集空间	13
三、碎屑岩储层中的胶结物及对物性的影响	13
四、碎屑岩储层的成分、结构和构造及其对物性的影响	14
五、碎屑岩储层的成因类型及分布特征	14
第二节 碳酸盐岩储层及其特点	27
一、岩石类型	27
二、物性特征	28
三、储集空间	28
四、孔隙的成因	29
第三节 泥质岩类储层	29
一、储集空间类型	29
二、泥质岩储层的形成条件	30
第四节 低渗透致密储层	30
一、低渗透致密储层的研究现状	30
二、低渗透致密储层的基本地质特征	31
第三章 储层的成岩演化及其模型	37
第一节 砂岩储层的主要成岩作用	37
一、压实作用和压溶作用	37
二、胶结作用	37

三、交代作用	39
四、粘土矿物的转化	40
五、溶蚀作用	42
第二节 成岩相划分	43
一、强压实成岩相	43
二、弱压实成岩相	43
三、弱压实弱胶结成岩相	43
四、强压溶成岩相	43
五、早期碳酸盐胶结成岩相	44
六、晚期碳酸盐胶结成岩相	44
七、二氧化硅胶结成岩相	44
八、溶蚀成岩相	44
第三节 成岩阶段的划分	44
一、划分依据	44
二、成岩阶段的划分	44
三、各成岩阶段的主要标志	46
第四节 成岩作用的影响因素	47
一、埋藏深度的影响	47
二、砂岩的成分、结构、构造等因素对成岩作用的影响	48
三、生物扰动构造对成岩作用的影响	51
四、有机质演化对成岩作用的影响	53
五、油气的聚集对成岩作用的影响	55
六、构造位置和断层活动对成岩作用的影响	56
第五节 成岩演化模式	61
一、东德克萨斯棉花谷砂岩(上侏罗统致密含气储层)成岩作用模式	62
二、大气水埋藏成岩作用模式	62
三、中国东部断陷湖盆碎屑岩储层成岩作用综合模式	64
四、不同地温场盆地碎屑岩储层成岩演化模式	65
五、不同成岩环境下的成岩作用模式	67
第六节 碳酸盐岩储层成岩作用	71
一、白云岩化作用	71
二、溶解作用	71
三、胶结作用	72
四、压实作用	72
五、重结晶作用	73
第七节 碳酸盐岩储层成岩阶段的划分及主要指标	73
一、成岩阶段划分的依据和方案	73
二、成岩标志的选择	73
三、成岩阶段及标志的描述	73
第八节 影响碳酸盐岩储集空间的主要因素及演化模式	76

一、主要因素	76
二、碳酸盐岩矿物的特点	76
三、成岩作用及埋藏历史	77
四、成岩作用模式	78
第四章 储层的微观孔隙结构	79
第一节 储集岩的孔隙空间和孔隙结构	79
一、储层的孔隙空间	79
二、储层的孔隙结构	79
第二节 碎屑岩储集层的孔隙类型	79
一、原生孔隙	79
二、混合孔隙	80
三、次生孔隙	80
四、碎屑岩储集岩的孔隙和喉道	84
第三节 碳酸盐岩的孔隙类型及孔隙结构特征	85
一、碳酸盐的孔隙类型	85
二、碳酸盐岩的喉道及孔隙结构类型	89
第四节 研究孔隙结构的方法	91
一、压汞法的实验装置及操作	91
二、压汞法研究孔隙结构的基本原理	92
三、毛细管压力曲线	93
第五节 毛管压力资料在研究孔隙结构中的应用	95
一、孔隙结构和孔隙喉道分布的定量评价	95
二、评价储层	97
三、应用排驱毛管压力曲线和相对渗透率曲线确定油水分布	97
第六节 孔隙结构对石油采收率的影响	99
一、基本概念	99
二、剩余油的状态	99
三、油藏中剩余油的形成和分布	99
四、孔隙结构和采收率	102
第五章 储层非均质性研究	107
第一节 储层非均质性的分类	107
一、Pettijohn 的分类	107
二、Haldorset 的分类	108
三、裘亦楠的分类	108
四、其它分类方案	110
第二节 储层非均质性的研究内容和方法	110
一、层内非均质性	110
二、层间非均质性	114
三、平面非均质性和三维非均质性	118
四、储层非均质性的影响因素	120

第三节 储层非均质性对储层开发的影响	120
一、泛滥河道砂岩体的开发特征	120
二、三角洲平原分流河道砂岩体的开发特征	122
三、河口砂坝的开发特征	123
第六章 储集层敏感性	125
第一节 油气储集层损害的机理	126
一、岩石成分及孔隙结构对储层损害的影响	126
二、外来流体与储层相互作用导致储层的损害	128
第二节 储集层敏感性评价	129
一、速敏性实验及评价	132
二、水敏性实验及评价	133
三、盐敏性实验及评价	134
四、酸敏性实验及评价	134
五、碱敏性实验及评价	136
六、正反向流动实验及评价	136
七、体积流量敏感性实验及评价	137
八、系列流体敏感性实验及评价	137
第七章 储层描述与储层地质模型的建立	138
第一节 测井资料的数据标准化	138
一、直方图平移法	139
二、趋势面分析法	139
三、均值校正法	141
四、变异函数分析法	141
第二节 关键井的选择与“四性”关系研究	143
一、关键井的选择及其研究内容	143
二、研究“四性”关系的方法及测井解释模型的建立	144
第三节 有效厚度划分及夹层扣除标准研究	149
一、有效含油层界限的确定	150
二、有效厚度划分标准	150
三、夹层扣除标准及方法	151
第四节 储层横向追踪的地震技术	152
一、波阻抗反演法(合成声波测井法)	152
二、波形振幅分析方法	153
三、三维地震技术	153
四、VSP 技术	154
五、一维和二维地震模型技术	154
六、频谱分析方法	155
第五节 储层地质模型的建立	156
一、储层地质模型的类型及级别	156
二、河流相储层模型的建立	159

第八章 储层综合分类及评价	162
第一节 碎屑岩储层的综合分类评价	162
一、根据砂岩的孔隙类型和毛管压力特征的分类评价方法.....	162
二、根据砂岩的厚度、连续性、物性、孔隙结构及产能等参数进行分类评价方法.....	164
第二节 碳酸盐岩储层的分类评价	167
一、分类依据.....	167
二、分类方案.....	170
第九章 储层实验测试技术	171
第一节 薄片鉴定中的新技术	171
一、铸体薄片制作.....	171
二、一片多用分析技术.....	171
第二节 扫描电子显微镜	171
一、基本原理.....	173
二、扫描电镜下应搜集的资料.....	174
第三节 电子探针及能谱仪对自生矿物成分的测定	176
一、基本原理.....	176
二、用途.....	176
第四节 X 衍射分析技术	177
一、基本原理.....	177
二、用途.....	177
第五节 阴极发光技术	177
一、阴极发光显微镜.....	177
二、应用.....	178
第六节 沉积岩矿物包裹体分析技术	178
一、基本概念.....	178
二、包裹体的研究方法及应用.....	179
第七节 稳定同位素分析	179
一、沉积环境的恢复.....	180
二、介质盐度分析.....	180
三、矿物成份及其成因分析.....	180
四、油气生成与运移分析.....	180
第八节 图象分析仪	181
一、岩石铸体薄片平面上孔隙特征参数的提取.....	181
二、应用.....	181
第九节 粘土阳离子交换容量及盐基分量的测试	182
一、基本概念.....	182
二、方法及原理.....	182
三、阳离子交换容量分析的应用与意义.....	183
第十节 砂岩中粘土矿物绝对含量测定及其地质应用	183
参考文献	184

绪 论

储层是地下石油和天然气储集的空间和聚集的场所,是油气勘探和开发的主要对象和目的层。储层地质学又名开发地质学,指油气田投入开发后,地质工作者应用地质、地球物理、油层物理、分析化验等资料,利用计算机等先进的技术和设备对储层和地下流体习性进行详细描述和预测的一门学科。

石油生成与储集是石油地质学中的两大核心问题,因此,储层地质学是石油地质学的一个重要分支和发展方向,是在油气田勘探与开发长期实践中逐渐兴起和完善的一门综合性、实践性较强的边缘学科。

目前,世界上大部分主力油气田生产高峰期已过,相当一部分油田进入了中、高含水期,油气田勘探、开发的难度越来越大。石油地质工作者面临着在勘探成熟区增加油气储量,在开发成熟区提高采收率的挑战。即充分利用地质、地震、测井等资料对储层进行研究、预测砂体的几何形态和空间分布特征,寻找隐蔽的复杂的油气藏,增加油气后备储量。同时还要结合开发动态资料对储层进行精细描述,建立储层地质模型,预测剩余油的分布规律,为提高最终采收率提供可靠的地质依据。因此,储层地质学日益受到石油界的关注。它的研究已正式列入油田地质师,石油工程师的工作日程。近年来,多次召开国际储层表征技术研究讨论会,并出版了论文集。美国石油地质学家协会通报主编,莫比尔石油公司地质学家詹姆斯 A·赫维格,呼吁石油地质学家们:在勘探发现油气,建立储量阶段,在油气开采的各个阶段,都要彻底了解储层地质,而不致有误。

我国是油气资源十分丰富的国家之一,由于大多数油田采用注水保持长期稳定高产的开发方针,所以各油田对储层描述工作都给予了高度的重视,20世纪60年代大庆油田的小层对比和油砂体研究技术,不仅为大庆油田的长期稳定高产奠定了坚实的基础,而且在科学技术水平上已处在当时的世界前列。20世纪80年代石油地质基础理论不断完善和边缘学科的广泛应用,改变了许多传统观念,为储层地质学的发展提供了丰富的理论依据,1985年以来,油气储层评价研究和油藏描述技术,被列为部级和国家级重点科研课题,取得了一批优秀的科研成果,某些技术已达到世界先进水平,这些科研成果的推广和应用,使我国储层研究,储层描述,储层评价等技术大大前进了一步。

目前,新的勘探方法和分析手段提供了详尽而可靠的地质、地球物理、地球化学、油层物理、测试分析等数据。为储层地质学向多学科、多手段综合研究方向发展创造了条件,使储层研究成为一个系统工程,即从勘探到开发各个阶段,从宏观到微观,从定性到定量全方位的对储层进行描述和预测。并将基础研究与工程工艺相结合,协同地球物理、油藏工程等各专业共同攻关,高水平、高效率地为油田勘探、开发服务。

储层地质学是以基础地质学、石油地质学等学科为理论基础,与油矿地质学在内容上互相渗透,彼此结合的一门综合学科。

通过本课程的学习,使学生可以综合应用地质、测井、地震、测试等方法,对储层进行详细描述,掌握流体在储层中分布和变化规律,为扩大油田后备储量,稳定产量,提高最终采收率,提供可靠的地质依据。

第一章 储集层的基本性质

地下石油和天然气都是储存在各类储集层之中,储集层的孔隙性、渗透性及流体饱和度是油、气储层的基本属性,也是划分油气层的重要依据,他们直接控制了地下油气的储量和产能,是油气田勘探、开发的基础资料之一。

第一节 储集层的概念及分类

一、储集层的概念

油田开发实践表明,地下流体主要储存在岩石的孔隙、裂缝和洞穴之中,并且在一定条件下,流体可以在其中流动。地下流体主要指的是石油、天然气和地层水;油、气经运移聚集,在特殊地质条件下可形成油气藏。

凡是能够储存和渗滤流体的岩石均称为储集岩。储存流体主要由岩石的孔隙性决定,而渗滤流体则由岩石的渗透性决定。由储集岩所构成的地层称为储集层。

若储集层中含有工业价值的油、气流则称为油层、气层或油气层。

勘探实践证明,在组成地壳的沉积岩、火成岩和变质岩中都发现有油气田,但99%以上的储量集中在沉积岩中,其中又以砂岩和碳酸盐岩储集层为主。近年来,随着石油地质理论的发展和完善,油气田勘探水平的提高,人们在火成岩,变质岩及泥页岩中找到油气藏的数量越来越多,不久的将来,人们可望在上述岩类储集层中找到更多的油气储量。

二、储集层的分类

根据研究目的及油田生产实践的需要,对储层有各种分类方案,常见的方案有以下几种。

1. 岩性分类

岩性分类,即是根据储集层的岩石基本类型进行分类,是一种简单而实用的分类方法,通常可将储集层分为三种基本类型。

(1) 碎屑岩储集层

指的是由砾岩,砂岩、粉砂岩组成的油气储层。主要由砂岩组成的储集层称为砂岩储层,是世界上分布最广的一类储层。

(2) 碳酸盐岩储集层

指的是由石灰岩,白云岩等碳酸盐岩组成的油气储集层。如礁灰岩储集层,是世界上单井日产量最高的一类储层。

(3) 其它岩类储集层

指的是由火成岩,变质岩或泥页岩组成的油气储集层。近年来世界各地都发现了一些火成岩、变质岩、泥页岩为储层的油气田。该类储层的岩石类型,储集空间类型及其形成机制都很复杂。目前,其油气储量仅占世界总储量的一小部分,但随着常规储层的不断开发,为了寻找石油及天然气的后备储量,这类储层的研究将会变得越来越重要。

形成这类储层的主要地质原因是风化作用和构造断裂作用。火成岩、变质岩经过风化作用都可以形成风化壳,从而成为缝洞比较发育的储集体。但风化作用只能在地面附近一定深度内

进行,到达基岩内部逐渐消失。

风化壳储层在纵向上分带性明显;自上而下分为崩解带,淋滤带,水解带(图 1-1)。

崩解带位于风化壳的表层,崩解产物在风化壳表面形成残积层,厚度可达 150m。下部常由角砾岩、砂泥质角砾岩组成,向上逐渐变细。

淋滤带位于崩解带的下部,由于大气淡水的淋滤作用形成各种不规则的溶缝和溶洞。这些裂缝可能是在构造裂缝的基础上形成的。溶缝、溶洞可被后来的碳酸盐胶结物,硅质胶结物充填和半充填。此带的厚度为几十米到上百米。例如辽河油田兴隆台花岗片麻岩风化壳淋滤带,厚度为 76~191.5m。

水解带位于淋滤带之下,在此带之内,由于矿物的水解作用,形成新的矿物,只产生微量的小孔隙。

风化壳储层的储集空间的大小、形态及分布规律与岩性有关,不同的岩性其风化难易程度不同,溶蚀作用的结果亦千差万别。

此外,还与古地形和古气候有关,古地形决定着溶解和风化产物是否能及时搬运走。湿润的气候条件以化学风化为主,化学风化易形成溶蚀孔洞。而在干燥的气候条件下则以物理风化为主,易形成碎屑角砾岩内的粒间孔隙。

裂缝是火成岩、变质岩、泥页岩的主要储集空间。除构造断裂作用形成的构造裂缝外,还有节理和成岩裂缝。如鸭儿峡油田志留系变质岩储层的储集空间主要为节理和裂缝,其裂缝密度高达 740 条/米。再如柴达木盆地的油泉子油田第三系泥岩储层,其储集空间也主要是节理和裂缝。此外,岩浆喷出地表在冷凝过程中形成柱状节理缝,火山弹冷凝收缩形成放射状和环状裂缝,气体在岩浆体内爆炸形成隐爆裂缝。这些裂缝均可构成喷出岩储层的储集空间。

2. 物性分类

物性分类指的是按储层的孔隙性或渗透性进行分类。按孔隙性可将储层分为高孔隙度储层,中孔隙度储层和低孔隙度储层。按渗透性可将储层分为高渗透率储层,中渗透率储层和低渗透率储层。通常人们是将孔隙性与渗透性结合起来对储层进行分类,将储层分为常规储层和致密储层两个基本类型,其中常规储层可分为五个小类,致密储层可分为三个小类,详见(表 1-1)所示。

表 1-1 按物性储层分类表

按物性分类		孔隙度(%)	渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)
常规储层	特高孔高渗储层	>35	>2000
	高孔高渗储层	35~30	2000~500
	中孔中渗储层	30~20	500~100
	低孔低渗储层	20~15	100~10
	特低孔低渗储层	15~10	10~1
致密储层	一般致密储层	10~5	1~0.1
	很致密储层	5~2	0.1~0.01
	超致密储层	<2	<0.01

世界各地储层物性差异很大,很难找到一个统一的分类标准,往往各油田都有自己的分类方案。

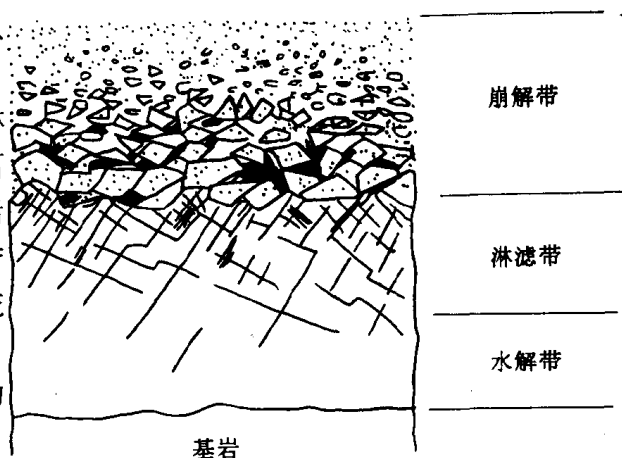


图 1-1 风化壳储层在纵向分带示意图

3. 按储集空间分类

(1) 孔隙型储层

该类型储层的储集空间以各种类型的孔隙为主,如粒间孔隙,大多数砂岩储集层属此种类型。

(2) 裂缝型储层

该类储集层的储集空间以各种类型的裂缝为主,岩性一般较致密,孔隙不发育。而裂缝既是油气的储集空间,也是油气运移的通道。如伊朗加奇萨兰油田阿斯马利石灰岩储集层。

(3) 溶洞——裂缝型储层

此类储集层的储集空间,以各种溶蚀孔洞为主,孔隙不发育,但裂缝较发育,溶蚀的孔隙和洞穴是主要的储集空间,而裂缝则为渗滤的通道。如四川盆地川南下二迭统灰岩储集层。

(4) 孔隙——裂缝型储层

该类储集层的储集空间为各种成因的孔隙及裂缝。是碳酸盐岩中分布比较广的一类储集层。

(5) 孔、洞、缝型储层

该类储层的储集空间主要为各种类型的孔隙、溶蚀洞穴及裂缝,孔、洞、缝相互搭配组成统一的储集体,往往孔隙度、渗透率都较高,易于形成储量大,产量高的大型油气田。

第二节 储集岩的孔隙性

储集岩的孔隙空间是指储集岩中未被固体物质所充填的空间,也称其为储集空间,是储集油气的场所。它不仅与油、气运移、聚集关系密切,而且,在开发过程中对油气的渗流也具有十分重要的意义。储集空间包括粒间孔隙,粒内孔隙、裂缝、溶洞等各种类型的孔、洞、缝。就其形态和分布而论是相当复杂的孔喉网络(图 1-2)。

孔喉网络多具有极大的随机性和不确定性,严格说来,地壳上所有的岩石多多少少都具有储集空间,只不过孔隙空间的大小、多少、结构不同罢了。下面主要就孔隙空间的大小和多少进行论述。

一、孔隙空间的大小

根据孔隙直径和裂隙宽度,以及对流体的作用,可将孔隙空间划分为三种类型。

1. 超毛细管孔隙:

孔隙直径大于 0.5mm,或裂缝宽度大于 0.25mm。其中流体在重力作用下可以自由流动,服从静水力学的一般规律。岩石中一些大的裂缝、溶洞及未胶结砂岩孔隙,大部分属此种类型。

2. 毛细管孔隙:

孔隙直径介于 0.5~0.0002mm 之间,或裂缝宽度介于 0.25~0.0001mm 之间,无论孔隙当中的流体质点之间,还是流体与孔隙之间,都处在分子引力的作用下,流体已不能在其中自由流动,只有当外力大于毛细管阻力时,流体才能在其中流动。岩石中的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:

孔隙直径小于 0.0002mm,裂缝宽度小于 0.0001mm。由于流体质点之间,流体与周围介质之间的分子引力相当大,所以,在地层条件下,流体不能在其中流动。粘土岩和致密页岩一般属此种孔隙。

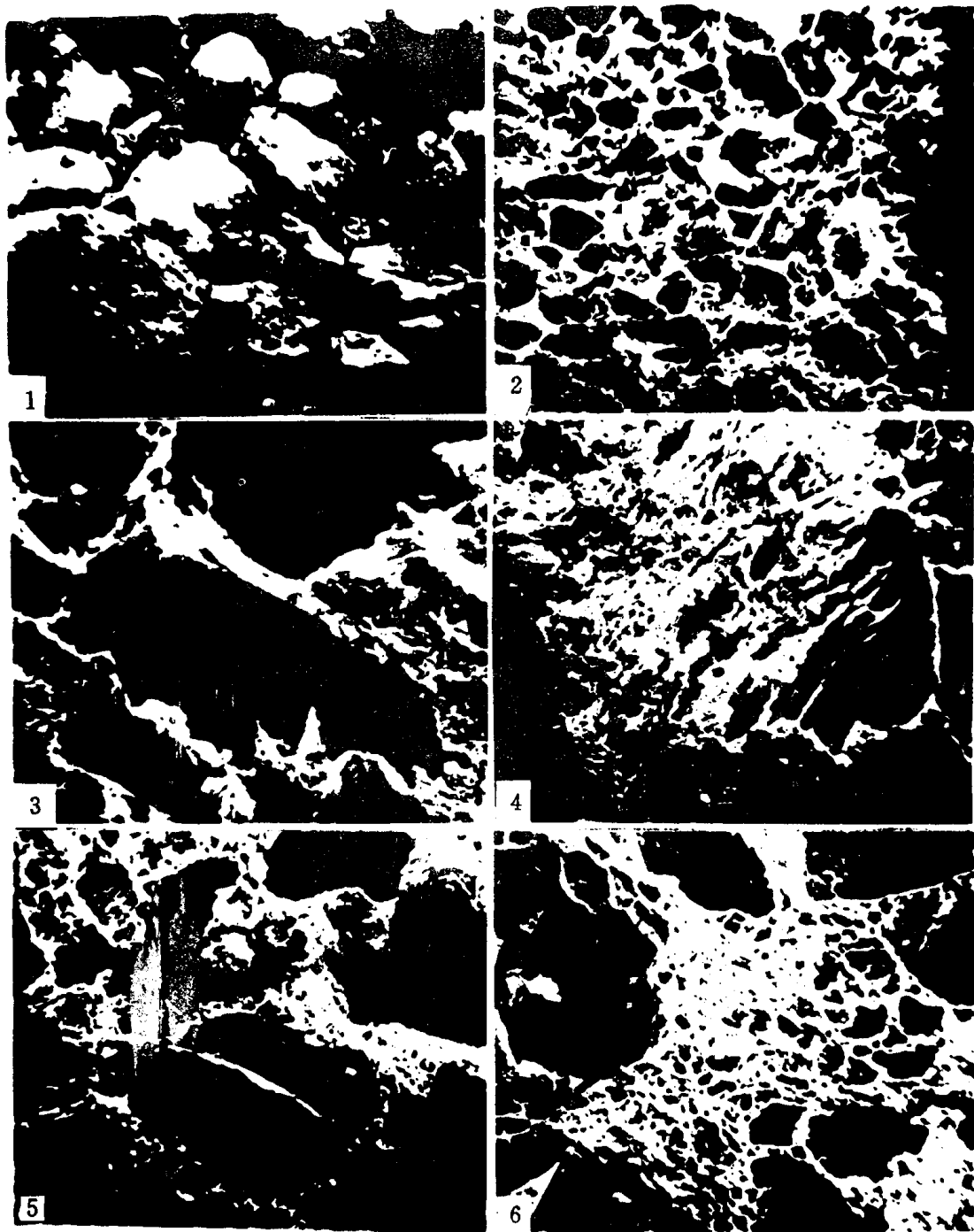


图 1-2 孔喉网络电镜照片

上述三种孔隙中,只有超毛细管孔隙、毛细管孔隙,对油气的储集是有意义的。

二、孔隙度和裂隙率

孔隙度和裂隙率都是表示岩石中储集空间发育程度的参数。

1. 孔隙度

孔隙度是指岩样孔隙空间体积与岩样体积之比。根据研究目的不同,孔隙度又可分为绝对孔隙度、有效孔隙度及流动孔隙度。

(1) 绝对孔隙度:岩样中所有孔隙空间体积之和与该岩样总体积的比值,称为该岩样的绝对孔隙度或总孔隙度可用下式表示:

$$\phi_a = \frac{\Sigma V_p}{V_r} \times 100\%$$

式中 ϕ_a ——绝对孔隙度

ΣV_p ——岩样中全部孔隙体积之和, cm^3 ;

V_r ——岩样总体积, cm^3 ;

储集岩的绝对孔隙度越大,只能说明岩石中的孔隙空间越大,而不能说明流体是否能在其中流动。实践证明,只有那些互相连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙才具有实际意义,因为他们不仅能储存油气,而且允许油气在其中渗滤,这些孔隙是有效的。而那些孤立的,互不连通的孔隙和微毛细管孔隙,即使其中储存有油和气,在当今工艺条件下,也不能开采出来,因此说,这些孔隙是无效的。为了研究孔隙对油、气的有效性,人们又提出有效孔隙度的概念。

(2) 有效孔隙度:是指那些参与渗流的连通孔隙总体积(即有效孔隙体积),与岩石总体积的比值。可用下式表示:

$$\phi_e = \frac{\Sigma V_e}{V_r} \times 100\%$$

式中 ϕ_e ——有效孔隙度;

ΣV_e ——有效孔隙体积之和, cm^3 ;

V_r ——岩样总体积, cm^3 ;

(3) 流动孔隙度

在岩石的孔壁表面常吸附着水膜或油膜,相对缩小了流体的流动空间,为此,从油田开发实际需要出发,提出了流动孔隙度的概念。流动孔隙度系指在一定压差下,流体可以在其中流动的孔隙体积与岩石总体积的比值,用下式表示:

$$\phi_f = \frac{\Sigma V_f}{V_r} \times 100\%$$

式中 ϕ_f ——流动孔隙度;

ΣV_f ——流动孔隙体积之和, cm^3 ;

V_r ——岩样总体积, cm^3 ;

同一岩样的流动孔隙度在数据上是不确定的,随孔隙中流体的物理——化学性质变化而变化。

对同一岩样,在相同条件下,其绝对孔隙度大于有效孔隙度,而有效孔隙度又大于流动孔隙度。对于疏松的砂岩,有效孔隙度接近于绝对孔隙度,对于较致密的泥岩,有效孔隙度与绝对孔隙度的差值相当大。

目前,有多种研究岩石孔隙度的方法,但归纳起来可分为直接法和间接法两大类,直接法

即利用地层中的岩石样品在实验室中直接测定而得,通常在实验中测定的岩石孔隙度是在地表条件下进行的,其测量结果往往大于地层中原始状态下的岩石孔隙度。间接法即利用各种地球物理参数,通过相应的公式计算地层中原始状态下的岩石孔隙度。可分为测井法与地震法两类。

在实际应用中,常常将直接法和间接法所求取的结果相互验证,补充、取长补短,以达综合使用之目的。

2. 裂隙率

裂隙对储集层具有十分重要的意义,裂隙的发育程度可用裂隙率来表示。岩石的裂隙率是指岩石中裂隙体积与岩石总体积的比值。其数学表达式为:

$$\phi_c = \frac{\sum V_c}{V_r} \times 100\%$$

式中 ϕ_c ——裂隙率;

$\sum V_c$ ——岩石中裂隙体积, cm^3 ;

V_r ——岩样总体积, cm^3 ;

测定裂隙率的方法有几何公式法,曲率法,面积法等各种方法,其中面积法应用比较广,既可以适用于室内显微镜下的薄片鉴定统计,也可以适用于野外地质测量和井下岩心描述。面积法是根据裂缝的长度、宽度应用数理统计的方法计算裂隙率。其数学表达式为:

$$\phi_c = \frac{\sum_{i=1}^n b_i L_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

式中 ϕ_c ——裂隙率;

b_i ——测量面积内裂缝平均宽度, mm ;

L_i ——测量面积内裂缝的总长度, mm ;

S_i ——观测面积, mm^2 ;

n ——观测次数。

许多储集岩既有孔隙也有裂缝,当裂缝比较发育的时候,常将岩样分割成板状,柱状或块状,此时测出的孔隙度往往不能真实反映岩石储集空间的发育程度,储集空间的发育程度应用孔隙度与裂隙率之和来表示。

第三节 储集岩的渗透性

储集岩的渗透性是指在一定压差下,岩石允许流体通过的性能。同孔隙性一样,渗透性也是储层最重要的参数之一。它不但控制着储能,而且控制着产能。从数量上度量岩石渗透性的参数叫岩石的渗透率,渗透率是一个具有方向性的向量,也就是说从不同方向测得岩石渗透率是不同的。根据生产实践的需要,人们将渗透率分为绝对渗透率,有效渗透率和相对渗透率。

一、绝对渗透率

1. 绝对渗透率的概念

当岩石为某单一流体所饱和时,岩石与流体之间不发生任何物理——化学反应,在一定压差作用下,流体呈水平线性稳定流动状态,所测得的岩石对流体的渗透能力称为该岩石的绝对

渗透率。

2. 达西定律

达西定律是1856年法国人亨利·达西用未胶结砂做水流渗滤试验得出的一个经验公式，后人为纪念他，把这一公式命名为达西公式或称达西定律。这一定律是目前研究岩石渗透率的理论依据。

达西公式为：
$$q = k \frac{A}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta L}$$

通常以干燥空气或氮气为流体，测定岩石的绝对渗透率。达西公式为：

$$k = \frac{2P_0 q \mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \times 10^{-1}$$

式中 k —— 岩石绝对渗透率, μm^2 ;

P_0 —— 大气压力, MPa;

q —— 大气压力下的气体流量, cm^3/S ;

μ —— 气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$;

L —— 岩样长度, cm ;

A —— 岩样截面积, cm^2 ;

$P_1 - P_2$ —— 气体通过岩样两端压力差, MPa。

理论上讲,绝对渗透率仅与岩石性质有关,而与流体性质及测定条件无关。但在实际测定工作中,人们发现同一岩样、同一种气体、在不同的平均压力下,所测得的绝对渗透率是不同的。低平均压力下测的渗透率较高,高平均压力下测得的渗透率较低。平均压力为无穷大时,测得的渗透率称为克氏渗透率。同一岩样在相同的平均压力下,不同气体测得的绝对渗透率也是不同的。通常密度大的气体测得的渗透值偏低,液体为介质测的渗透率总是低于气体测的渗透率。

3. 渗透率的测定方法

储层岩石渗透率的测定方法有若干种,归纳起来可分为直接测定和间接测定两种基本方法。直接测定法是利用储层的岩样在实验室中用各种渗透率测定仪直接进行测定。一般先将岩样抽提、洗净、烘干、预制成一定几何的形状,在一定的温度和压力下,应用空气、氮气或水渗透岩样来直接测定。间接测定法,主要是利用岩石渗透率与其它参数之间的关系,应用一些经验公式,间接地计算出渗透率值。如常用地球物理测井资料、水动力学试井资料计算储层的渗透率值。

4. 渗透率与孔隙度的关系

大量资料表明,岩石的孔隙度

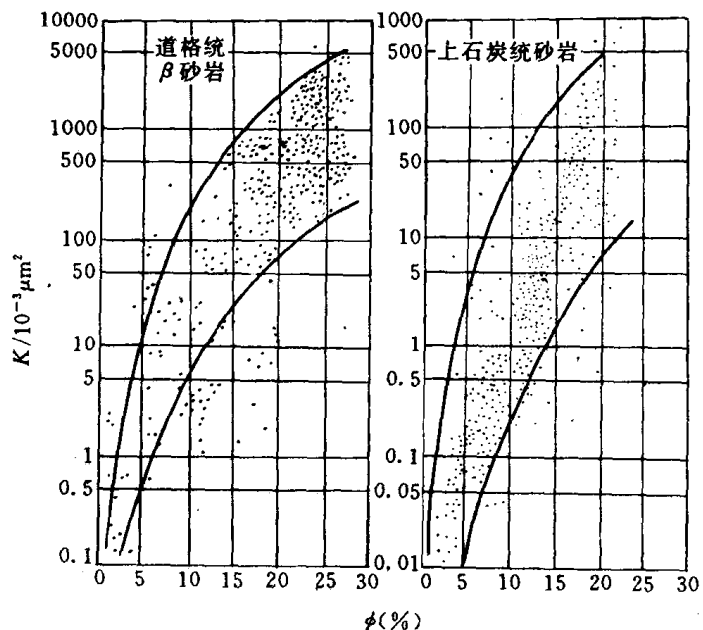


图 1-3 孔隙度与渗透率关系曲线