

高等学校教材

油(气)层物理学

张博全 王岫云 编

中国地质大学出版社

石油大学图书馆

054600

TE 311

011



00400152

高等学校教材

油(气)层物理学



200416870

张博全 王岫云编



中国地质大学出版社

内 容 提 要

本书主要阐明储油(气)岩石、油(气)层流体及储油(气)岩石饱和多相流体的物理性质;油气在油气层中运移、聚集和开采过程中的物理性质及其在油气勘探、开发中的应用。全书共分4篇13章。第一篇储油(气)岩石的物理性质,第二篇储油(气)层中流体的物理性质,第三篇多相流体饱和的储油(气)岩石物理性质,第四篇流体(油气)在油(气)层中运动的物理性质。

本书取材广泛、内容丰富,综合了国内外主要成果;阐述简明扼要、文图并茂。可作为石油地质、油藏工程地质、油田开采专业教材或教学参考书,也可供从事石油地质勘探和开发的地质工作者、科研人员以及中等专业学校和职工大学有关专业的师生参考。

11/45/20

高等学校教材

油(气)层物理学

张博全 王岫云 编

责任编辑 蒋良朴 张桂珍

责任校对 冯汉英

*

中国地质大学出版社出版发行

(武汉市喻家山)

湖南省地矿局四〇二队彩色印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张 15 字数 365 千字

1989年12月第1版 1989年12月第1次印刷

ISBN 7-5625-0265-X/P·75

印数1—2000册 定价: 3.05元

前 言

众所周知，油气层既是找油勘探的对象，又是油气田开发的对象。以往油（气）层物理学都是为油气田开发服务，并作为它的理论基础。近年来，为了提高勘探成功率，日益认识到储层研究的重要性，因而石油地质工作者急需掌握油（气）层物理学有关知识。作者一改传统习惯，让油（气）层物理学既为找油勘探服务，也为油气田开发服务。因此作者首先系统而全面地阐述了以储层评价为核心的有关物理知识和油气在油（气）层中运移、聚集的物理知识。然后阐述油气在开采中从油层排驱到油井的有关物理知识，其中特别对开采中排驱能量、排驱方式和石油采收率以及提高采收率的途径做了较全面而系统地论述。从而为找油勘探和油气田开发打下系统和扎实的油（气）层物理理论基础。

本教材是依据1981年地矿部教育司批准的油（气）层物理学教学大纲为指导，在我校多年编写的讲义和校内教材基础上，经历届学生的试用，并收集了有关专家、学者、生产科研人员提出的许多宝贵意见，以1984年校内铅印教材为蓝本修改而成。修改过程中特别注意教材的科学性，博采众长，吸收美苏两大学派的精华，但又自成体系；注意逻辑性，使其符合认识规律；还注意教材先进性，广泛收集了1984年以来的国内外新进展。此外注意贯彻少而精和理论联系实际的原则，使各篇章中心明确，重点突出，在基本概念、原理叙述清楚后又介绍相应的实验仪器和有关计算以便学以致用。

教材由张博全主编，王岫云参加第十三章编写。这次正式出版由张博全统纂修定，其中包括第十三章采收率部分的重要补充和修改。

原试用教材承蒙徐怀大教授、晏同珍教授以及曲志浩副教授评审，提出了许多宝贵意见，极大地帮助了全书的修改工作。试用教材初稿还承蒙王启军教授、马正副教授、姚俊安副教授审阅，在此一并表示衷心的感谢！由于作者水平所限和时间紧迫，书中难免存有不妥之处，敬请读者指正。

编 者

1988年12月

目 录

绪论.....	(1)
---------	-------

第一篇 储油（气）岩石的物理性质

第一章 储油（气）岩石的粒度、比面和胶结物质.....	(5)
§ 1 储油（气）岩石的粒度.....	(6)
§ 2 储油（气）岩石的比面.....	(9)
§ 3 储油（气）岩石的胶结物质.....	(11)
第二章 储油（气）岩石的孔隙度和孔隙结构.....	(14)
§ 1 储油（气）岩石的孔隙类型.....	(14)
§ 2 储油（气）岩石的孔隙度.....	(18)
§ 3 储油（气）岩石的裂隙（缝）率及其计算.....	(25)
§ 4 储油（气）岩石的孔隙结构.....	(27)
第三章 储油（气）岩石的渗透率.....	(39)
§ 1 达西定律及其表达式.....	(39)
§ 2 储油（气）岩石渗透率的影响因素.....	(48)
§ 3 储油（气）岩石渗透率的测定.....	(52)
§ 4 裂隙（缝）性储油（气）岩石的渗透率.....	(55)
§ 5 储油（气）层渗透率的计算.....	(57)
第四章 储油（气）岩石流体饱和度和其它物理性质	(62)
§ 1 储油（气）岩石的流体饱和度.....	(62)
§ 2 储油（气）岩石的压缩性.....	(66)
§ 3 储油（气）岩石的热学性质.....	(69)
§ 4 储油（气）岩石的声、光、电、磁、放射性等性质.....	(70)

第二篇 储油（气）层中流体的物理性质

第五章 储油（气）层烃类体系的相态特征.....	(76)
§ 1 单组分体系.....	(77)
§ 2 双组分体系.....	(79)
§ 3 多组分体系.....	(81)
§ 4 典型的油气藏相态图.....	(83)
第六章 天然气的物理性质.....	(86)
§ 1 天然气的状态方程式.....	(86)
§ 2 天然气压缩因子的计算.....	(91)
§ 3 天然气体积系数.....	(98)
§ 4 天然气压缩系数.....	(99)
§ 5 天然气的密度和相对密度.....	(100)
§ 6 天然气的粘度.....	(102)

§ 7 天然气在石油中的溶解和分离	(105)
§ 8 天然气中水蒸气和水化物的形成	(110)
第七章 油层液体的物理性质	(113)
§ 1 理想溶液与真实溶液	(113)
§ 2 油层石油的相对密度和密度	(115)
§ 3 油层石油的压缩系数	(118)
§ 4 油层石油体积系数	(120)
§ 5 油层石油的粘度	(124)
§ 6 油层水的物理性质	(129)
第八章 油 (气) 层流体的高压物性研究	(135)
§ 1 高压物性仪简介	(135)
§ 2 油 (气) 层流体的高压物性研究	(136)
§ 3 高压物性实验数据的匀整	(137)
§ 4 油 (气) 层流体的相态方程简介	(141)

第三篇 多相流体饱和的储油 (气) 岩石性质

第九章 储油 (气) 岩的表面能、表面吸附和表面润湿现象	(147)
§ 1 表面能与表面张力	(147)
§ 2 储油 (气) 岩石的表面吸附	(152)
§ 3 储油 (气) 岩石的润湿性	(156)
第十章 储油 (气) 岩石的毛细管压力	(163)
§ 1 基本概念	(163)
§ 2 油层毛细管压力的测定	(167)
§ 3 油层毛细管压力曲线特征	(171)
§ 4 油层毛细管网络与毛细管压力参数	(176)
§ 5 油层毛细管压力资料的应用	(181)
第十一章 储油 (气) 岩石的相 (有效) 渗透率与相对渗透率	(193)
§ 1 基本概念	(193)
§ 2 两相体系	(194)
§ 3 三相体系	(198)
§ 4 相对渗透率的测定和计算	(200)
§ 5 相渗透率与相对渗透率曲线的应用	(203)

第四篇 流体在油 (气) 层中的运动

第十二章 流体 (油气) 在油 (气) 层中的运移和封闭	(206)
§ 1 油气在油 (气) 层中的运移	(206)
§ 2 油气在油 (气) 层中的封闭	(209)
第十三章 流体 (油气) 在油 (气) 层中排驱与开采	(214)
§ 1 油气在油 (气) 层中排驱和排驱方式	(214)
§ 2 油气开采和提高采收率的途径	(222)
主要参考文献	(235)

绪 论

一、油气资源在国民经济中的地位和今后增加油气资源的途径

石油和天然气是一种极其重要的能源资源和宝贵的战略物质，也是一种优良的化工原料和机械润滑材料。今天它已渗透到国民经济的各个部门。它以发热量高（1t石油约等于1.4t煤的发热量）、开采成本低、输送方便等优点，自进入本世纪已迅猛发展（如表1）。

表1 世界煤、石油和天然气产量表（据石油化工科技1977, No23, 略作补充）

年 份	煤 ($\times 10^8$ t)	石油 ($\times 10^8$ t)	天然气 ($\times 10^9$ m ³)
1920	13.72	0.93	
1930	14.79	1.95	570
1940	13.00	2.62	870
1950	17.75	5.23	2623
1960	22.03	10.48	4680
1970	25.63	22.54	10750
1980	27.51	31	16418

从表1可看出，石油和天然气几乎以每十年翻一番的高速度向前发展。石油和天然气工业的迅猛发展也引起了世界燃料消费构成的巨大变化（见表2）。

表2 世界燃料消费构成比例表（据石油化工科技，1977No23, 略作补充）

年 份	煤 (%)	石油 (%)	天然气 (%)	水和原子能发电 (%)	合成燃料 (%)
1929	76.0	14.2	4.2	5.6	
1937	70.5	17.0	5.1	6.5	
1950	58.6	23.7	10.2	7.5	
1960	47.0	34.4	16.4	2.2	
1970	37.8	43.9	22.0	2.3	
1978	18.0	54.0	18.0	10.0 (核能3.0)	
1990(预测)	20.0	45.0	18.0	15.0 (核能7.0)	2
2000(预测)	24.0	37.0	16.0	19.0 (核能10.0)	4

从表2可以看出，1960年以来油气在世界能源消费的比例已大于煤炭所占比例。到了1970年仅石油所占比例就大于煤炭所占比例。也就是说，世界总能源结构已由煤为主转为以石油和天然气为主。

根据美国埃克森石油公司1979年12月发表的研究报告，对包括油、气、煤和核能在内的各种能源到本世纪末的供需情况，合成油、气的发展以及主要工业国家能源消费构成的变化

进行了预测。认为到本世纪末，核能的发展速度最快，合成油、气将集中在北美几个国家，而石油在世界能源供应中仍然是比任何其他燃料都重要的一种能源。因此可以毫不夸张地说，石油和天然气是当今世界经济发展中必不可少的主要能源。

我国油气资源从解放前只有两个小油田、三处小气田，到今天已找到近 300 个油气田，产油量已达 $1.2 \times 10^8 \text{t}$ ，进入世界前四名的行列。但是我国油气资源在整个能源比例中还是不高的，燃料消费中还是以煤为主。若以人口平均来说，那就更低。随着四个现代化的发展，我国对油气资源的需求将大大增加。因此，加速寻找油气资源，增加油气产量，是我国经济建设首当其冲的战略任务。

如何寻找油气资源，增加油气产量呢？从目前世界各国的经验来看，不外有两个途径：一是寻找新的油气田，扩大油气后备储量；二是提高现有油气田的采收率，增加油气产量。

对于石油地质工作者来说，必须通晓和掌握扩大油气资源、增加油气产量所必需的知识，为实现四个现代化贡献力量。

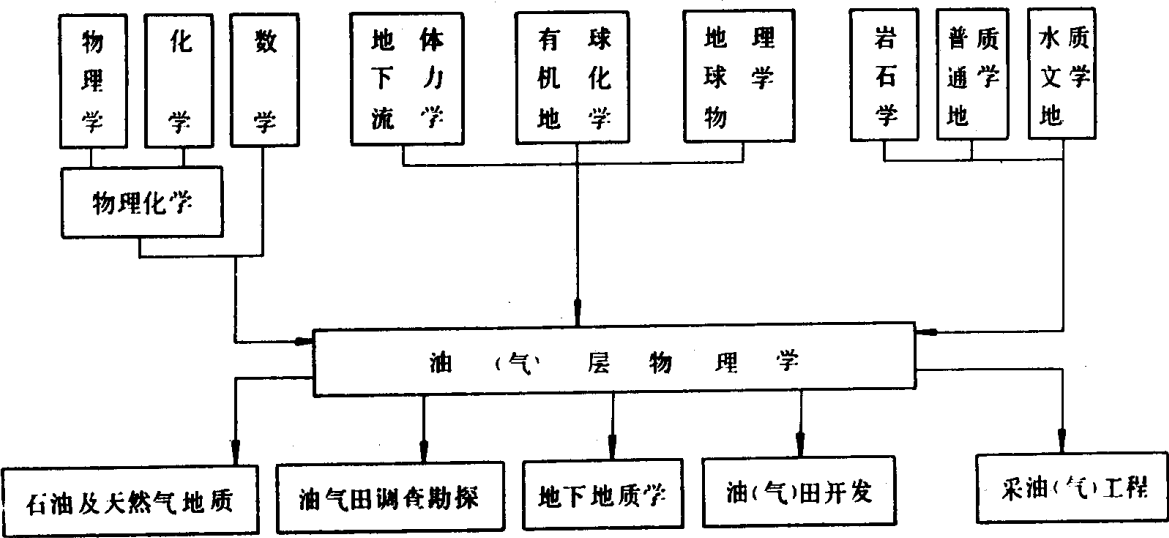
二、油（气）层物理学研究的内容及其与其它课程的关系

油（气）层物理学是以油（气）层为对象，用物理和物理化学的观点研究与石油地质、油气田开发有关的物理和物理化学现象的科学，简称油层物理学。由于它与寻找油气资源和增加油气产量有极密切的关系，因此属于必修的专业基础课。

油（气）层物理学的研究内容主要包括以下方面：

- (1) 储油（气）岩石的物理性质；
- (2) 储油（气）层中流体的物理性质；
- (3) 多相流体饱和的储油（气）岩石的物理性质；
- (4) 油气在油（气）层中的运移和封闭；
- (5) 油气在油（气）层中的排驱和开采。

油（气）层物理学与其它课程关系如下：



从这个简表中可以看出，油（气）层物理学是建立在三类基础课程上。一类是基础课，如数理化，其中以物理化学课关系最密切；一类是专业基础课，如地下流体力学、有机地球化学等，其中以地下流体力学关系最密切；再一类是地质基础课，如岩石学、普通地质学等，

其中以沉积岩石学关系最密切。而油(气)层物理学本身则直接为专业课(石油地质、调查勘探、地下地质学)和工程课(油气田开发、采油气工程)服务,并作为它们的理论基础。

三、油(气)层物理学的发展概况

油(气)层物理学是一门比较年青的学科,距今还不到50年历史。最早从事这方面研究的是30年代的法奇(G.H.Fancher)和从事油气田开发的生产第一线人员。在早期主要是为了有效地开发地下油气田,当时侧重于地下流体性质的测试技术。40年代美国M.麦斯盖特(1949)所著《采油物理原理》,把过去关于储油(气)岩石和油、气、水流体性质的片断及零碎资料上升到理论,从而指导了各种驱动类型油气田的科学开发。

到了50年代,苏联Ф.И.卡佳霍夫(1956)所著《油层物理基础》,把油层物理从附属于采油工程中独立出来,组成了一门新的学科。60年代美国的J.W.阿米克斯(1960)等人的《油储工程》,全面而系统地概括了美国关于油层物理科学的发展,虽然它直接为油气田开发服务,但就其内容和体系来看也为油气田调查勘探服务,从而使油层物理学的研究进入一个新的阶段。

到了70年代,美国的詹恩等人(Dr. John et al)的《石油储油层性质评价》一书的出版。虽然他过多地谈了石油商品性质的评价,但从油层性质评价的观点来探讨问题,是富有启发性的。G.V.奇加林等(1972)的《碳酸盐岩石油天然气开采》,作者是从开采角度叙述了碳酸盐岩储层特征,然而却是第一本较系统和较全面地叙述了碳酸盐岩储层及其物理性质的书。D.威廉等(1973)的《石油流体性质》则比较系统和全面地阐述了油层流体(石油和天然气)的物理化学性质和有关计算。Mayer-Gurr(1976)的《采油工程》则扼要和较全面地阐述了采油中油层岩石和流体的物理性质。虽然比较简略,但由于内容较新,给人以深刻的印象。而苏联学者斯麦霍夫的《裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法》则是以专门探讨裂缝性储集层形成机理及其油气储量计算为特点的。卡佳霍夫及其助手新著《油层物理学》(1977),在原来《油层物理基础》上,对储油(气)岩的力学性质和孔隙结构有了新的概括和总结。还有И.П.马尔哈辛(1977)的《油层物理化学机理》则首次从物理化学观点探讨性地叙述了地层原油渗流运移的物理化学过程,强调欲提高采收率必须在油层物理传统基础上加强油层物理化学机理的研究。80年代主要是继续在碳酸盐岩储层、碎屑岩次生孔隙、油气流体的非牛顿体和相态方程应用上,油气运移和排驱中油层物理理论基础和应用上,以及实验测试和电算技术应用上有了新的发展。特别值得一提的是H.K.范·波伦等(1980)《提高采收率的原理》一书的问世,虽然书中主要是汇集了已发表的各种提高石油采收率的方法和资料,但对于各种方法机理和有关的油层物理知识也做了某些阐述,这无疑会给油层物理研究在提高石油采收率方面开辟一条广阔道路。

90年代的今天,油(气)层物理学,不论在理论的深度和广度上,还是实验测试和电算技术上,都进入了一个崭新的阶段,为献身于这一学科领域的青年敞开了大门。

四、石油地质专业开设本课程的目的、任务和学习方法

石油地质专业开设本课程的目的是使学生牢固地掌握油(气)层物理学的基本理论、基本知识和基本技能,为我国寻找更多的油气田和发展我国石油科学做出应有的贡献。其任务:

- (1) 牢固掌握油(气)层物理学的基本理论;
- (2) 牢固掌握油(气)层物理学的基本技能(包括实验和计算);
- (3) 通过实验和习题逐步树立严细的科学作风和实事求是的科学态度;

(4) 通过本课程学习,初步掌握科学地观察和分析石油地质和油气田开发中的物理化学现象,树立辩证唯物主义观点。

由于本门课程是研究油(气)层物理和物理化学现象的科学,因此与物理化学课关系特别密切。在学习过程中必须很好利用已学过的物理化学知识,及时搞清有关概念的物理化学意义,不要囫圇吞枣。另外,这是一门理论与实践并重的课程,因此学习时要重视实验和习题课。通过实验和习题课,不仅掌握有关实验和计算技能,而且还要达到巩固和深化课堂理论教学的目的。

第一篇 储油（气）岩石的物理性质

石油和天然气储存于地下的储油（气）岩层中。储油（气）岩层也简称储油（气）层，系指储油（气）岩石与岩石中流体（油、气、水）两者而言。由于石油和天然气是储存在微小孔隙里，因此储油（气）层与人工的油库是迥然不同的（图1-1）。人工的油库油-气、油-水是一个截然的水平面，而油（气）层却不是一个截然的水平面。人工油库由于重力分异作用，按相对密度大小（水在底层，石油在上层）互不相混。但在油（气）层中，石油和天然气层中均含有一部分水，即油（气）层中的含油、含气饱和度达不到100%，显然油（气）层具有独特的和复杂的物理性质。

油（气）层物理性质首先从储存油、气、水的天然贮存器——储油（气）岩石的物理性质研究起。储油（气）岩石可分为碎屑岩与碳酸盐岩。本篇将着重阐明碎屑岩储油（气）岩石的物理性质，同时概要的阐明碳酸盐岩储油（气）岩石的物理性质。

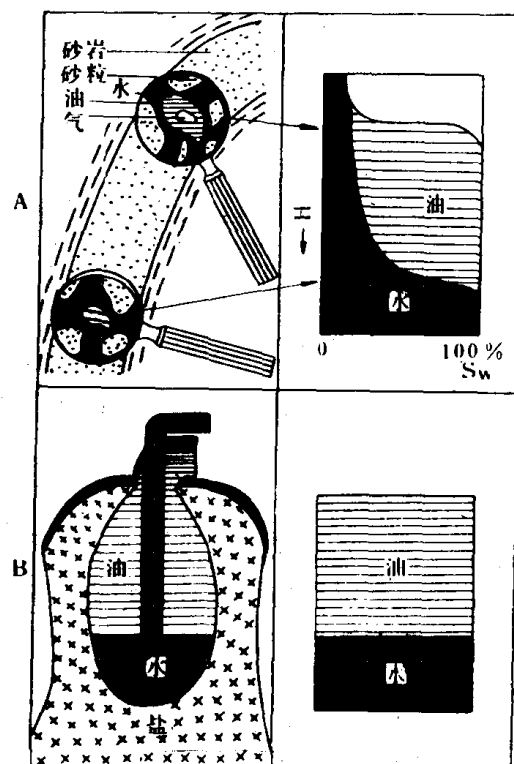


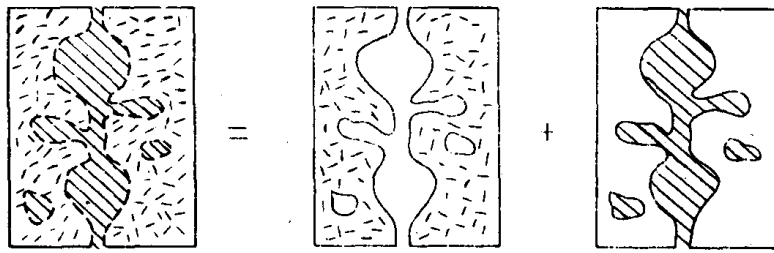
图1-1 油（气）层和人工油库

（据Mayer-Gürr, 1976）

A—油（气）层 B—人工油库

第一章 储油(气)岩石的粒度、比面和胶结物质

储油（气）岩从是否被固体物质充填的角度，可以分为两部分：一部分是岩石骨架（即岩石固体物质），另一部分是空隙（图1-2）。岩石骨架包括岩石的碎屑颗粒和胶结物质，而空隙则包括岩石的孔隙、裂隙和溶孔、溶洞。本章主要介绍岩石骨架性质——粒度、比面和胶结物质。



$$V_{\text{岩石}} = V_{\text{骨架}} + V_{\text{孔隙}}$$

图1-2 储油（气）岩骨架和空隙示意图

（据Mayer—Gurr, 1976）

§1 储油（气）岩石的粒度

碎屑岩储油（气）岩的碎屑物质是由大小不等的碎屑颗粒组成的。所谓粒度组成是指构成碎屑的各种大小不同的颗粒含量，通常以百分数表示。碎屑颗粒是属于机械搬运，它们的沉积受水动力条件（如水流介质、流量、流速等）控制。碎屑物质被埋藏后，除部分石英长石有次生加大和溶蚀外，一般颗粒变化不大，因而，可用来直接反映沉积时期的水动力条件，并为沉积环境的分析提供重要依据。因此碎屑岩的粒度研究近年来发展很快，目前已成为研究沉积相的一个独立分支。

碎屑颗粒是岩石骨架组成的主要部分，它的组成特征必然直接影响到储油（气）岩的有关物性参数，如孔隙度、渗透率、饱和度等。因此粒度是储油（气）岩（特别是碎屑类储油气岩）的一个重要物性参数。它不仅是储油（气）岩物性研究的基础参数，而且直接为油气田开发和开采服务，如含蒙脱石粘土矿物较多的油层段，就不宜于注水。除此，油层碎屑颗粒大小也直接决定着油井的完成方式。

一、粒度的测定

目前用于粒度的分析方法很多，从原始的手工测量到电子计算机控制的自动化仪器测量均有，如图1-3。

一般对于大的砾石，可在野外直接测量；较致密的细粒岩石，可用显微薄片法分析鉴定；对于较疏松的储油（气）岩，一般是用筛析和沉降法来完成。下面对筛析法和沉降法作一个简单介绍：

1. 筛析法

筛析是用成套的筛子分析碎屑颗粒（图1-4）。表示筛孔的方法通常有两种：

一种是以英制每吋长度上的孔数表示，称为目或号；另一种是以毫米直接表示筛孔孔眼大小。显然后者更为方便。另外成套筛子孔眼大小有一定的规定，例如相邻的两个筛子其筛孔大小相差为 $\sqrt{2}$ 或 $1/\sqrt{2}$ 。

通过最小号筛子的颗粒（即试样中小于0.074—0.053mm）如果还想再分析的话，可用沉降法。

2. 沉降分析法

沉降分析法的依据是斯托克（C.J.Stokes）公式，即：

$$v = \frac{gd^2}{18\mu} \left(\frac{\rho_1}{\rho} - 1 \right) \quad (1-1)$$

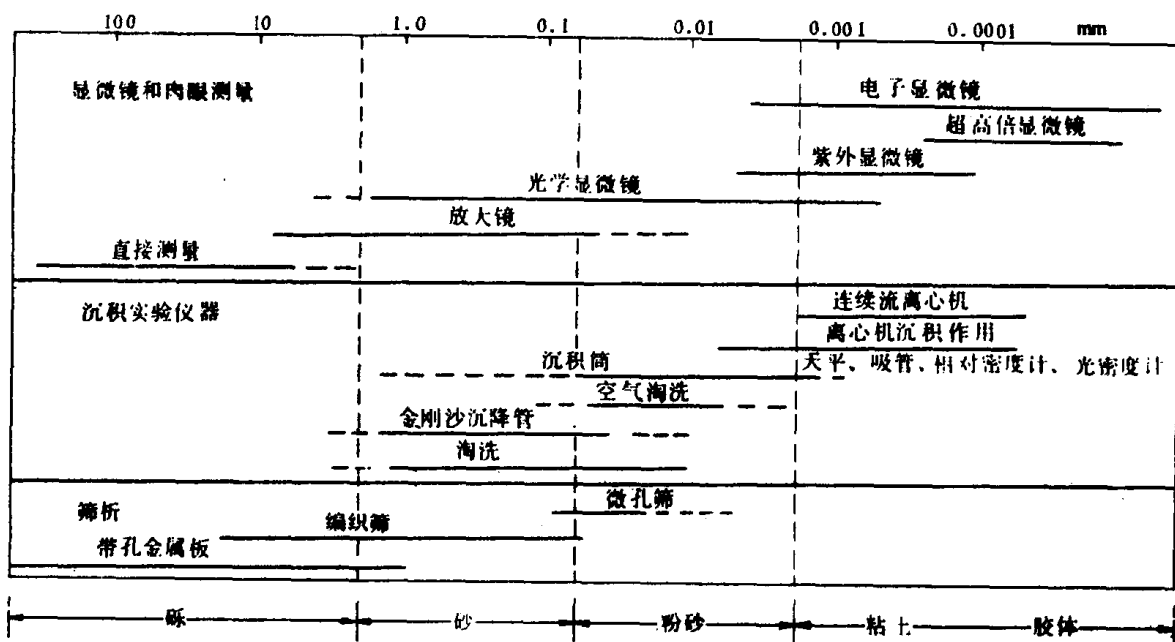


图1-3 各种粒度分析法及其适用范围

(据G.Muller, 1967)

式中： v ——直径为 d 的颗粒在密度为 ρ 的液体中的下降速度（cm/s）； d ——颗粒直径（cm）； ρ_1 ——颗粒密度（g/cm³）； μ ——液体的动力粘度（cp）； ρ ——液体的密度（g/cm³）； g ——重力加速度（980cm/s²）。

在公式推导时，斯托克曾做了某些假设，因此这一公式是有一定应用范围的。当颗粒为50 μ m—100 μ m时，实测值具有足够的精确度。对颗粒在分散介质中下沉速度影响较大的是它的浓度，因此在沉降分析时岩石颗粒的重量浓度不应超过1%。

在沉降分析中，油田上应用最广的是图1-5的吸管沉降分析仪。

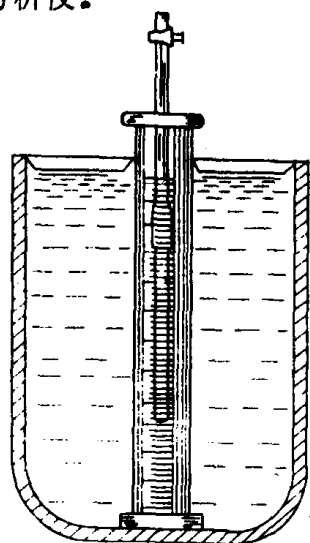


图1-5 沉降分析仪

(据卡佳霍夫, 1958年)

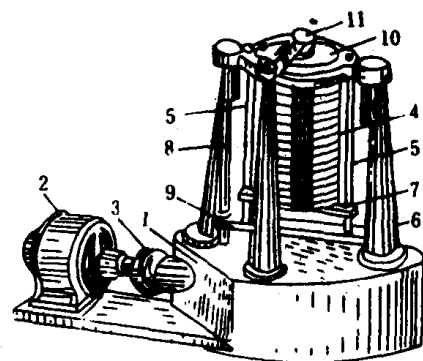


图1-4 振动筛示意图

1—机座 2—电动机 3—联轴器 4—筛子
5—导柱 6—底盘 7—卡箍 8—小轴
9—卡箍上横架 10—顶盖 11—撞击器

应该指出，筛析乃至沉降分析所给出的粒度百分含量只是一个范围，即直径 d_1 到直径 d_2 所含粒级的百分含量。如要准确求出这一粒级的平均直径 $\bar{d}$ ，可用下式：

$$\frac{1}{\bar{d}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \quad (1-2)$$

式中： $\bar{d}$ ——颗粒平均直径； d_1 、 d_2 ——分别为相邻的两个筛子的筛眼直径。

二、粒度的表示方法

粒度的表示方法有数字法和作图法。作图法常用的有直方图、频率曲线图、累积曲线图和概率曲线图等。但在矿场上经常用的是粒度组成分布曲线，如图1-6；粒度组成累积曲线，如图1-7。前者能表示出各种颗粒大小所占的百分数，其中某

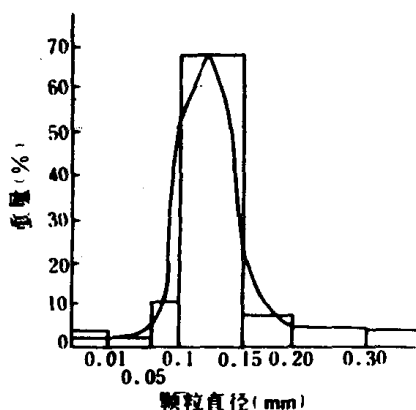


图1-6 粒度组成分布曲线

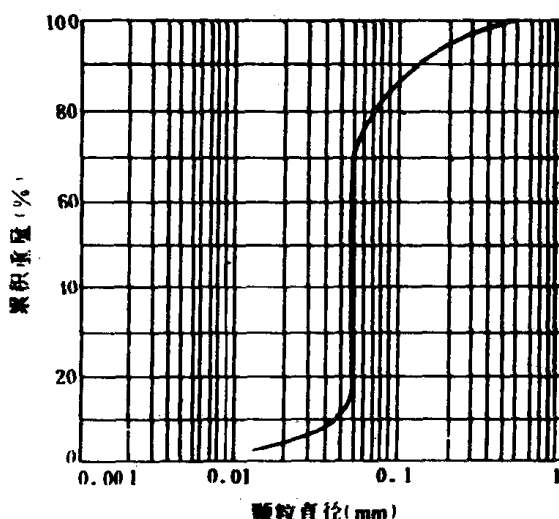


图1-7 粒度组成累积曲线

一矩形越高还可表明该砂样的粒度组成越均匀。但在实用上更多的还是后者，不仅从曲线的陡缓可以看出粒度组成的均匀性，而且根据累积曲线上的一些特征点可求粒度参数。

三、粒度参数计算

1. 不均匀系数

系指累积曲线上某两个累积重量百分数所代表的直径比值，一般采用累积重量60%的直径 d_{60} 与累积重量10%的直径 d_{10} 两者比值。如图1-7上 d_{60}/d_{10} 为1，即不均匀系数为1，表明粒度均匀。如果不均匀系数越大则越不均匀。一般储油岩的不均匀系数在1—20之间。

2. 分选系数

英美往往以累积重量25%、50%、75%三个特征点将累积曲线划分为四等份，(图1-7)①。然后按特拉斯克(P.D.Trask)的公式求出分选系数。即：

$$S = \sqrt{\frac{Q_1}{Q_3}} \quad (1-3)$$

式中： S ——分选系数； Q_1 ——25%处粒级直径； Q_3 ——75%处粒级直径。

按特拉斯克规定： $S=1-2.5$ 分选好， $S=2.5-4.5$ 分选中等， $S>4.5$ 分选差。

3. 福克(R.M.Folk)、沃德(W.C.Ward)粒度参数

特拉斯克确定的分选系数，只概括了粒度分布曲线的中间部分，不包括分布曲线上的粗尾和细尾部分。特别在沉积成因研究上，如按特拉斯克的划分，则几乎所有的沙丘砂、海滨浅滩砂、浅海陆棚砂及河成砂都属于 $S<2.5$ 分选好的一类。因此在沉积相的研究方面目前广泛采用福克、沃德的粒度参数。其有关计算公式如下：

$$\text{平均值 } M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (1-4)$$

$$\text{标准偏差 } \sigma_1 = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (1-5)$$

①用特拉斯克公式时，图1-7的粒径坐标从左到右减小。

$$\text{偏度 } S_K = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (1-6)$$

$$\text{峰态 } K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})} \quad (1-7)$$

上列各式中 ϕ_x ，即相应于 $x\%$ 处的粒径（以 ϕ 值表示），称之百分位数。例如 ϕ_{16} 即相应于16%处的粒径 ϕ 值，称为第16百分位数。如从概率密度看，两个百分位数值 ϕ_{16} 和 ϕ_{84} 在正态分布曲线上概括了 $(\sigma + \sigma)$ 和 $(\sigma - \sigma)$ 之间的范围；而 ϕ_5 和 ϕ_{95} 则概括了 $(\sigma + 1.65\sigma)$ 和 $(\sigma - 1.65\sigma)$ 之间的范围。因此福克、沃德的标准偏差概括了粒度分布曲线的大部分（包括粗尾和细尾部分）。

根据标准偏差值，福克、沃德和弗里德曼（G.M.Friedman）对于不同环境的大量样品分析之后，提出如表1-1的分选等级。

表1-1 根据标准偏差划分的分选等级

分选等级	标准偏差（ ϕ 单位）	
	按福克和沃德（1957）	按弗里德曼（1962）
分选极好	<0.35	<0.35
分选好	0.35—0.50	0.35—0.50
分选较好	0.50—0.71	0.50—0.80
分选中等	0.71—1.00	0.80—1.40
分选差	1.00—2.00	1.40—2.00
分选很差	2.00—4.00	2.00—2.60
分选极差	>4.00	>2.60

由于沉积物的分选程度与沉积环境的水动力条件有密切关系，因而标准偏差也与沉积环境有密切关系。人们根据粒度参数和粒度曲线就可以成功地判明沉积环境。

§2 储油（气）岩石的比面

一、概念及公式

粒度组成是表示碎屑储油（气）岩分散程度的一种指标，储油（气）岩的分散程度也可以用比面来表示。

所谓比面系指单位体积岩石内颗粒的总表面积，或单位体积岩石内孔隙的内表面积总和。其数学表达式如下：

$$S = \frac{A}{V} \quad (1-8)$$

式中： S ——岩石比表面积（ cm^2/cm^3 ）； A ——岩石颗粒总表面积或岩石孔隙的总内表面积（ cm^2 ）； V ——岩石体积（ cm^3 ）。

用岩石比面表示碎屑储油（气）岩分散程度比粒度更具优越性，这是因为比面是表示单位岩石体积的分散程度，有如密度参数的特性。岩石比面的大小直接决定了储油（气）岩的

孔隙度、渗透率和孔隙结构。由于比面影响到岩石与流体接触时所产生的表面分子现象，因而也直接影响到油气的运移和开采。因此深入研究储油（气）岩石的比面是很有意义的。

二、比面的计算和测定

1. 根据颗粒的组成求岩石的比面

这种方法适用于胶结疏松或不含粘土颗粒的岩石。

假定 1m^3 球形颗粒组合中有 n 个直径为 d 的颗粒，若设每个球形颗粒的表面积为 $S_i = \pi d^2$ ，又设每个球形颗粒的体积为 $V_i = \frac{1}{6}\pi d^3$ ，而每个球形颗粒组合体的孔隙度为 ϕ ，则在单位体积岩石颗粒所占的总体积为 $V = 1 - \phi$ ，那么单位体积岩石颗粒的数量为：

$$n = \frac{1 - \phi}{V_i} = \frac{6(1 - \phi)}{\pi d^3}$$

由此可以求出在单位体积岩石颗粒的总表面积，即比面为：

$$S = n \cdot S_i = n \times \pi d^2 = \frac{6(1 - \phi)}{d} \quad (1-9)$$

由于实际岩石是由不同直径的球形颗粒组成，因此必须根据粒度的分析资料来求比面。

若颗粒平均直径 d_1 的含量为 $\Delta g_1\%$ ，颗粒平均直径 d_2 的含量为 $\Delta g_2\%$ ，……颗粒平均直径 d_n 的含量为 $\Delta g_n\%$

则在单位体积岩石中，每种直径的颗粒总表面积为：

$$S_1 = \frac{6(1 - \phi)}{d_1} \times \Delta g_1\%, \quad S_2 = \frac{6(1 - \phi)}{d_2} \times \Delta g_2\%, \quad \dots\dots$$

$$S_n = \frac{6(1 - \phi)}{d_n} \times \Delta g_n\%$$

因而，单位体积所有颗粒的总表面积，即比面为：

$$S = \frac{6(1 - \phi)}{100} \times \sum_{i=1}^n \frac{\Delta g_i}{d_i} \quad (1-10)$$

自然界中岩石颗粒绝不是理想的球形，为了接近自然情况，尚需在上式引进一个校正系数“ c ”，它是由于颗粒形状不规则而引起的比面增加。据经验此系数为1.2—1.4。则比面为

$$S = c \frac{6(1 - \phi)}{100} \times \sum_{i=1}^n \frac{\Delta g_i}{d_i} \quad (1-11)$$

对于含粘土矿物较多的岩石，或胶结较致密的岩石，由于粒度测定的误差大，因而用上式公式求比面精确度低。

2. 根据吸附法求比面

这是基于吸附到表面上的蒸气数目与表面积有关来计算比面的。使用的仪器有ST—03型比表面仪，它可以测定象石灰岩等极细颗粒的比面，目前已用于生产和科研。

此外，岩石比面也可以用薄片法进行统计计算。

§3 储油（气）岩石的胶结物质

储油（气）岩石的胶结物质是指除碎屑颗粒和杂基以外的化学沉淀物质。通常是结晶的与非结晶的自生矿物。在碎屑岩中含量小于50%，它对颗粒起胶结作用，使之变成坚硬的岩石。

由于胶结物质是化学沉淀物质，故可按照结晶程度、晶粒的相对大小、分布的均匀性以及胶结物质本身的结构特征进行描述。储油（气）岩常见胶结物结构如图1-8。

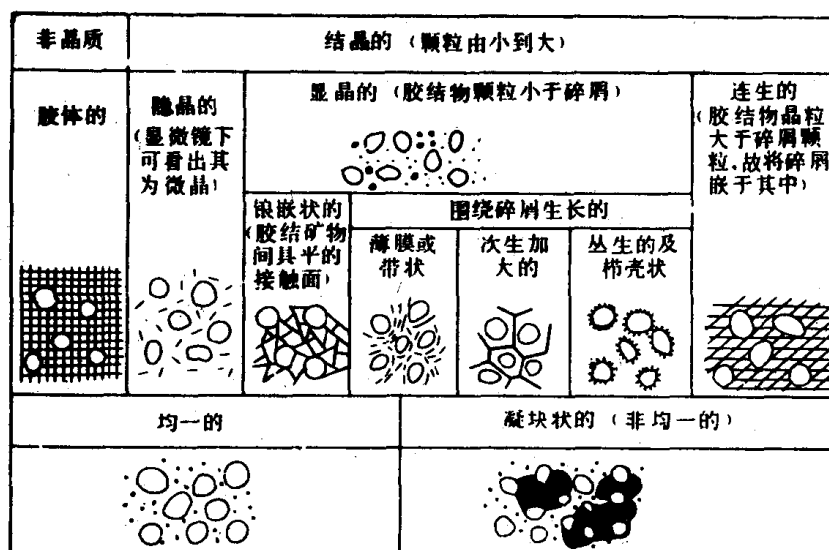


图1-8 储油（气）岩常见胶结物结构

（据刘宝珪，1980）

碎屑岩中胶结物质总是使储油物性变差。随着胶结物成分变化与胶结类型的不同，粒间的孔隙将变为充填残留孔隙或充填物内孔隙，使孔隙变小，因此胶结物与储油物性之间有着密切的关系。

影响碎屑颗粒胶结致密程度的是胶结物的成分。胶结物的成分可分为泥质、灰质（钙质）、硫酸盐及硅质。最常见的是泥质和灰质，其次为硫酸盐和硅质。

1. 泥质（粘土矿物）胶结物

砂岩中粘土矿物一般有两种来源，一种是随沉积物沉积的碎屑粘土矿物，多以涂层或斑点状的形式分布在砂岩骨架外边或孔隙空间；一种是在原有矿物沉积基础上再结晶形成的粘土矿物，存在于部分砂岩骨架中。

砂岩中粘土矿物的产状和分布特点与沉积物的母岩、沉积环境、水动力条件有密切关系。碎屑岩储油（气）岩的粘土矿物多为高岭石、水云母（伊利石）、蒙脱石、绿泥石、拜来石等。从电镜扫描结果来看，粘土矿物产状有以下几种类型：

（1）斑点式：一般多为高岭石和少量的针状云母、蒙脱石等，象“补丁”一样不连续地附在孔隙壁或充填在孔隙之间，使通道变窄，但对流体的流动影响尚不严重，如图1-9。

（2）薄膜式：这种粘土矿物主要为水云母、绿泥石、蒙脱石等。颗粒较小，排列规则，围绕颗粒或孔隙边缘呈环带薄膜生长，使通道变窄，对流体流动有一定影响，如图1-9。

（3）桥式：这种粘土矿物多为绿泥石、水云母，呈纤维状、针状在颗粒之间延伸，有时两边的粘土矿物还连结起来，象“桥”一样横跨孔隙空间，使孔隙内又成了很多微孔隙，流