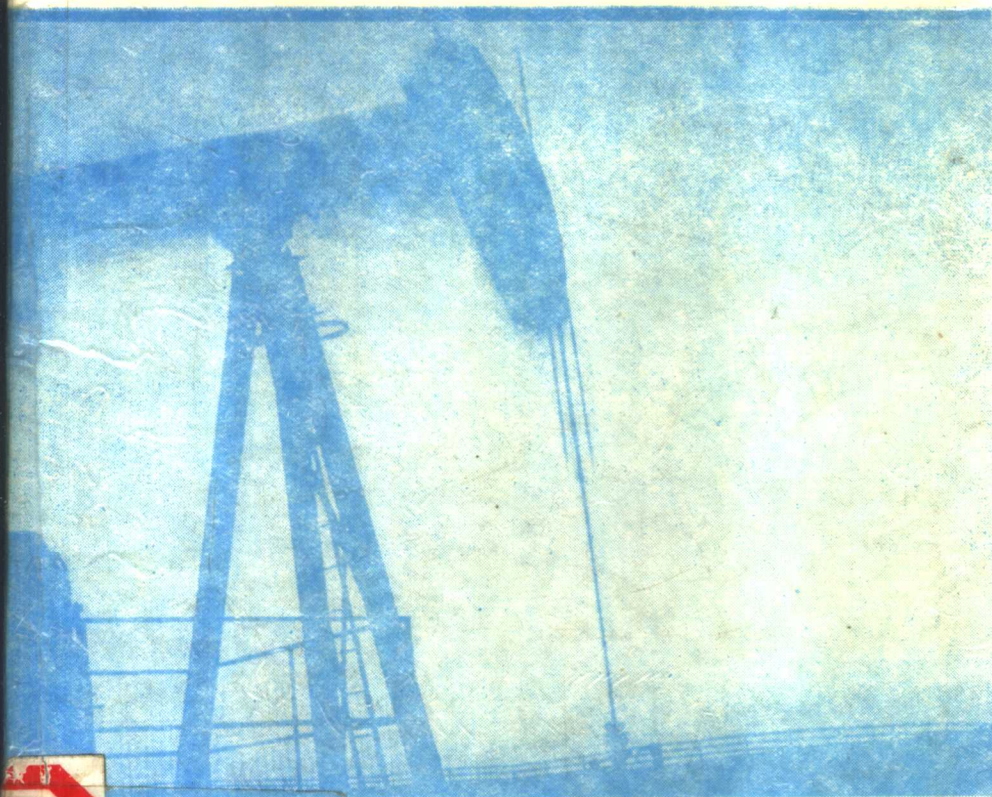




高等学校教学用书

# 油 层 物 理

何更生 编



北京)

石油工业出版社

高等学校教学用书

# 油 层 物 理

何更生 编

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

### 内 容 提 要

本书主要包括储层岩石各物理特性的概念及测定方法; 储层流体的物理特性、相态特征及地下、地面的换算关系; 多相流体的渗流机理和提高采收率的方法等内容。在阐述基础理论的同时, 紧密联系生产实际, 列举各种计算以加深理解。并在储层中粘土的影响、敏感性评价、状态方程式、裂缝储层的描述及提高采收率等内容上有自己的特色。

本书适合高等院校石油开采、油藏工程、石油地质和应用化学专业使用, 也可供矿场地质、油藏工程技术人员及科研人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

油层物理 / 何更生编。—北京: 石油工业出版社, 1994.11  
ISBN7-5021-1094-1

I. 油…  
II. 何…  
III. 油层物理  
IV. TE311

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

\*

787×1092 毫米 16 开  $19\frac{1}{2}$  印张 480 千字 印 1-2000

1994 年 11 月北京第 1 版 1994 年 11 月北京第 1 次印刷

定价: 11.30 元

## 前 言

本教材是为石油高校编写的，经过多次试用、修改和补充，它可作为油藏工程、采油工程、石油地质及油田应用化学专业的教科书，以及相近专业的教学参考书，并可供矿场和有关科研技术人员参考。

近年来，石油勘探及开发的各学科发展很快，尤其是油气藏评价、油气藏数值模拟、渗流力学、提高石油采收率的需要，更加促进了油层物理这门基础学科的发展。因此需要有新的教材来反映该学科近年来的成就，以满足读者由浅入深、循序渐近、符合认识论的要求，作者正试图努力作这方面的尝试。

书中凡标有 \* 号者均为选学内容，可根据不同专业需要选择讲授。也可作为自学内容。

全书初稿经林平一教授审阅，并得到西南石油学院院系领导以及油藏工程教研室黄秉光、孙雷、裴柏林、黄湘、唐海、彭彩珍、叶鸣等同志的支持与帮助。随后又得到石油院校同仁的支持，提出了不少宝贵意见。本书在正式出版前，由秦同洛教授主审，洪世铎教授对本书第三章提出了很多中肯的意见，使本书得到更好的充实。本书还参考了许多未正式出版的文献，未能在参考文献中列出，在此一并表示深切的谢意。

由于学科发展很快，很多方面都在推陈出新，限于时间和水平，有些内容难以完全反映到本书内，若有不当之处，希望同行及读者批评和指正。

编者

一九九三年十一月

## 绪 论

石油的英文词是 petroleum (petro 是希腊文, 意思是指岩石, Oleum 是拉丁文, 意思是指可燃油), 原意为“石油是产自岩石中的可燃油”。而油层物理 (petrophysics) 正是研究储层岩石、岩石中的流体 (油、气、水) 以及流体在岩石中渗流机理的一门学科。

油层物理作为一门学科, 可以说是以 1949 年美国 M. 马斯盖特的《采油物理原理》发表作为一个开端。50 年代, 原苏联莫斯科石油学院  $\Phi \cdot \Pi \cdot$  卡佳霍夫教授著作《油层物理基础》是油层物理从采油工程中单独分科的起点, 随后这门学科得到了更广泛更深入的发展。自 60 年代起, 我国和世界上其它国家如美国、原苏联和加拿大等, 都相继出版了反映这些研究成果的多种不同版本的有关油层物理的书籍, 尽管书名叫法不同 (如油藏工程基本原理等), 但内容大体一致。而在各种杂志上发表的有关文章就更多了。

在内容上, 油层物理从岩石的基本性质 (如孔隙度、渗透率) 的测定开始, 逐渐发展到流体的测试研究, 接着是多孔介质中多相渗流的理论和试验方法, 岩石表面性质的研究方法和毛管压力、孔隙结构等微观物理的理论与研究方法。

那么, 当前国内外油层物理研究究竟发展到什么水平, 反映出什么特点呢?

在常规岩心分析方面, 目前国外已经形成了一套比较完整的标准程序和比较完善的操作规程; 在分析方法上, 在早期的经典方法基础上, 每项分析测定又都针对不同类型的岩样, 发展了针对性更强的多种测试方法; 为适应取心技术的发展 (如冷冻取心), 实验室又建立了相应的室内分析技术。目前国外比较先进的服务性实验室, 多用计算机来处理和分析试验结果, 采用统一的格式发送试验报告。除此之外, 在常规岩心分析的质量控制上, 国外已有一套比较完善、比较成熟的办法, 如美国岩心公司采用的各种方法进行交叉检验; 公司总部备有标准样品, 如标准渗透率岩样和测定孔隙度的标准体积块等, 再送各地区实测对比。我国近几年来, 在上述方面也已取得了较大的进展。

在专项岩心分析方面, 初步形成了静态分析试验和动态分析试验的标准系列。静态试验项目包括: 毛管压力测定、地层因素测定、地层电阻率指数测定、声速测定、孔隙体积压缩系数测定、在上覆岩压下的孔隙度、渗透率测定以及润湿性的测定。动态试验项目包括: 各种相对渗透率的测定、注水试验、吸入法、驱替法测定残余气; 提高采收率试验; 为评价地层敏感性的流动试验。总的来看, 专项岩心分析项目正在向前发展, 预计一二十年内, 该领域的测试方法将会更加成熟。

在地层流体分析方面, 人们将烃类流体分为普通原油 (即黑油)、易挥发油、凝析气和干气等四个系列, 并按各自比较定型的流程进行分析。在有关相态研究中, 与三次采油相结合 (如气驱、混相驱), 从而扩大了这方面的研究领域。

在多相渗流机理方面, 进行多种类型流体、不同注入工作剂时的物理化学渗流和非牛顿流体渗流的研究。例如, 人们对于物化渗流中的对流、扩散、吸附、弥散、互溶、传质、相变及非牛顿流体在多孔介质中的流变性等也都有了进一步的认识。此外, 在不同压力、温度、不同驱油工作剂等因素对驱油效率的影响方面进行理论、实验及现场研究。

油层物理今后的发展, 将由于科学发展与工程的需要, 综合性更强, 更需要学科间的互

相渗透、互相配合而构成新的边缘学科。同时，为了更好地了解油藏实际条件下油层物理各方面的性质，今后的分析测试和模拟实验将朝着模拟油藏的实际条件方向发展。

油层物理学是地质、采油、油藏、油化等专业的一门重要专业基础课，它既要运用到许多基础理论，又在专业上有着广泛的实际应用。因此，学习这门课除了具备数、理、化基础知识外，普通地质、岩石学、物理化学以及流体力学等都是学习油层物理学应具备的基础。另一方面，油层物理又是一门专业基础课，在渗流力学、油藏数值模拟、油气田开发、油田应用化学、提高油气采收率、保护储集层技术、采油（气）工程等课程的许多方面，都要以它为基础进行广泛的论述及应用。

此外，油层物理学又是一门建立在实验基础上、实践性很强的学科。从事大量的实验研究，也是油层物理学研究方法的一大特点。

生产的需要和发展，是促进油层物理学科发展的动力，实际生产中不断涌现的新问题又给油层物理学提出了新的研究课题，随着对实际问题的深入研究，油层物理学必将继续发展、进步、深化！

# 目 次

## 绪 论

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 第一章 储层岩石的物理特性           | (1)  |
| 第一节 储层岩石的骨架性质           | (2)  |
| 一、岩石的粒度组成               | (2)  |
| 二、岩石的比面                 | (5)  |
| 第二节 储层岩石的孔隙结构及孔隙性       | (10) |
| 一、储层岩石的孔隙结构             | (11) |
| 二、岩石孔隙度的概念              | (13) |
| 三、双重孔隙度的概念*             | (16) |
| 四、岩石孔隙度的测定方法            | (17) |
| 五、孔隙度与表征性体积单元 (REV) *   | (20) |
| 六、影响孔隙度大小的因素            | (21) |
| 七、储层岩石的压缩性              | (23) |
| 第三节 储层岩石的流体饱和度          | (25) |
| 一、流体饱和度                 | (25) |
| 二、几个重要的饱和度概念            | (26) |
| 三、影响饱和度的因素              | (27) |
| 四、研究油、气、水饱和度的方法         | (28) |
| 第四节 储层岩石的渗透性            | (30) |
| 一、达西定律及岩石绝对渗透率          | (30) |
| 二、气测渗透率及气体滑动效应          | (34) |
| 三、裂缝岩石的渗透率*             | (39) |
| 四、影响岩石渗透率的因素            | (42) |
| 五、岩石渗透率的求取              | (44) |
| 第五节 储层岩性参数的平均值处理方法      | (48) |
| 一、几种求平均值的方法             | (48) |
| 二、以孔隙度、渗透率数值大小的主要范围表征储层 | (52) |
| 第六节 储层岩石的其它物理性质*        | (52) |
| 一、储层岩石的热学性质             | (52) |
| 二、储层岩石的导电性              | (54) |
| 三、储层岩石的声学特性             | (55) |
| 四、储层岩石的放射性              | (55) |
| 第七节 储层岩石的敏感性            | (56) |
| 一、胶结物及胶结类型              | (56) |
| 二、胶结物中的各种敏感矿物           | (57) |



|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 三、储层敏感性的评价方法 .....          | (62)  |
| <b>第二章 储层流体的物理特性</b> .....  | (68)  |
| 第一节 油气藏烃类的相态特征 .....        | (68)  |
| 一、油气藏烃类的化学组成和分类 .....       | (68)  |
| 二、油藏烃类的相态表示方法 .....         | (69)  |
| 三、单、双、多组分体系的相态特征 .....      | (71)  |
| 四、几种典型的油气藏相图 .....          | (77)  |
| 第二节 油气体系中气体的分离与溶解 .....     | (80)  |
| 一、天然气从原油中的分离 .....          | (80)  |
| 二、天然气向原油中的溶解 .....          | (84)  |
| 三、相态方程的建立 .....             | (87)  |
| 四、相态方程应用举例 .....            | (94)  |
| 第三节 天然气的高压物性 .....          | (99)  |
| 一、常温常压下天然气的主要物性参数 .....     | (100) |
| 二、天然气的状态方程和对应状态原理* .....    | (102) |
| 三、天然气的体积系数 .....            | (113) |
| 四、天然气的压缩系数 .....            | (115) |
| 五、天然气的粘度 .....              | (118) |
| 六、天然气水化物的形成* .....          | (123) |
| 第四节 地层原油的高压物性 .....         | (125) |
| 一、原油的化学组成和分类 .....          | (125) |
| 二、地层原油的溶解气油比 .....          | (127) |
| 三、地层原油的体积系数 .....           | (128) |
| 四、地层原油的压缩系数 .....           | (130) |
| 五、地层原油的粘度 .....             | (131) |
| 六、石蜡的性质和原油凝固点* .....        | (133) |
| 七、超深地层油气的特点* .....          | (134) |
| 第五节 地层水的高压物性 .....          | (135) |
| 一、地层水的矿化度和硬度 .....          | (135) |
| 二、地层水的分类 .....              | (136) |
| 三、地层水的高压物性 .....            | (139) |
| 第六节 地层油、气高压物性参数的获取和应用 ..... | (143) |
| 一、测定油气高压物性的仪器、流程及样品准备 ..... | (143) |
| 二、实验研究油气相态及测定其高压物性参数 .....  | (145) |
| 三、实验数据的匀整* .....            | (148) |
| 四、图版法求地层原油的高压物性参数 .....     | (152) |
| 五、经验关系式法计算原油高压物性参数 .....    | (155) |
| 六、地层流体高压物性参数应用示例* .....     | (158) |
| 第七节 本章主要内容 .....            | (161) |
| 一、地层油气水的化学组成 .....          | (161) |



|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 二、油气相态转换形式及表示方法·····                   | (161) |
| 三、油、气、水的高压物性参数及获得·····                 | (161) |
| <b>第三章 多相流体的渗流机理</b> ·····             | (164) |
| 第一节 储层岩石中的各种界面现象的回顾 <sup>*</sup> ····· | (164) |
| 一、储层流体的相间界面张力及其测定·····                 | (164) |
| 二、界面吸附现象·····                          | (172) |
| 三、润湿现象和毛管力·····                        | (176) |
| 四、界面粘度·····                            | (176) |
| 第二节 储层岩石的润湿性·····                      | (177) |
| 一、有关润湿的基本概念 <sup>*</sup> ·····         | (177) |
| 二、储层岩石的润湿性及其影响因素·····                  | (180) |
| 三、润湿滞后现象·····                          | (182) |
| 四、岩石润湿性与水驱油的相互影响·····                  | (184) |
| 五、油藏岩石润湿性的测定·····                      | (188) |
| 第三节 储层岩石的毛管压力曲线·····                   | (192) |
| 一、毛管压力概念综述·····                        | (192) |
| 二、岩石毛管压力曲线的测定和换算·····                  | (200) |
| 三、岩石毛管压力曲线的基本特征·····                   | (207) |
| 四、毛管压力曲线的应用·····                       | (209) |
| 第四节 储层岩石驱油过程中的阻力效应·····                | (216) |
| 一、水驱油的非活塞性·····                        | (216) |
| 二、毛管孔道中的各种阻力效应·····                    | (216) |
| 三、在几种简化岩石孔道中的渗流·····                   | (218) |
| 第五节 储层岩石的有效渗透率和相对渗透率曲线·····            | (225) |
| 一、相(有效)渗透率和相对渗透率的概念·····               | (225) |
| 二、相对渗透率曲线特征及影响因素·····                  | (226) |
| 三、相对渗透率曲线的测定和计算 <sup>*</sup> ·····     | (234) |
| 四、相渗透率和相对渗透率曲线的应用·····                 | (245) |
| <b>第四章 提高原油采收率机理</b> ·····             | (250) |
| 第一节 提高原油采收率的基本概念和认识·····               | (250) |
| 一、提高原油采收率的重要性和迫切性·····                 | (250) |
| 二、一次采油、二次采油、三次采油·····                  | (251) |
| 三、未注入工作剂时的采收率·····                     | (251) |
| 四、注入工作剂时的采收率·····                      | (254) |
| 第二节 影响原油采收率的因素·····                    | (256) |
| 一、油层非均质性的影响·····                       | (256) |
| 二、流度比及油层流体粘度对采收率的影响·····               | (258) |
| 三、油藏润湿性对采收率的影响·····                    | (260) |
| 第三节 残余油饱和度的分布及测定方法 <sup>*</sup> ·····  | (260) |
| 一、残余油的概念及分布·····                       | (260) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 二、毛管减饱和度曲线·····           | (262) |
| 三、确定残余油饱和度的方法* ·····      | (263) |
| 第四节 热力采油法·····            | (267) |
| 一、蒸汽吞吐法·····              | (267) |
| 二、蒸汽驱油法·····              | (268) |
| 三、火烧油层·····               | (269) |
| 第五节 混相驱油法·····            | (272) |
| 一、互溶混相驱概述·····            | (272) |
| 二、注液化石油气段塞法·····          | (274) |
| 三、富气混相法·····              | (274) |
| 四、高压干气混相法·····            | (275) |
| 五、二氧化碳驱油法·····            | (276) |
| 第六节 化学驱油法·····            | (278) |
| 一、油层流体及注入工作剂的流变性·····     | (278) |
| 二、聚合物溶液驱油法·····           | (279) |
| 三、活性剂溶液非混相驱油法·····        | (283) |
| 四、胶束—微乳液驱油法·····          | (287) |
| 附录 I 公式 (1-12) 的推导 ·····  | (292) |
| 附录 II 公式 (1-96) 的推导 ····· | (296) |
| 主要参考文献·····               | (298) |

# 第一章 储层岩石的物理特性

目前世界上已发现的油气储量 99%以上集中在沉积岩中，而沉积岩中又以碎屑岩和碳酸盐岩储集层为主。

碎屑岩储集层是目前世界上主要含油气区的重要储集层，它包括各种类型的砂岩以及没有胶结好或胶结很松散的砂层。其中，中、细砂岩和粉砂岩储集层分布最广、储油物性好，因此是我们油层物理学必须研究讨论的储层岩石。

碳酸盐岩储集层也是重要的产油气层。到目前为止，以碳酸盐岩为含油气层的油气储量，占世界总储量的一半；油产量则已达到世界总产量的 60%以上，可谓“半壁河山”。世界上有 9 口日产量曾达万吨以上的高产井，其中 8 口井产层属碳酸盐岩储集层。波斯湾盆地是世界碳酸盐岩油田分布最集中的地区，以产油著称。四川气田基本上都属碳酸盐岩类型，其中川南自流井气田已有二千多年的勘探和开发历史；在油田方面，我国继川中油田发现之后，近年又在河北任丘等地发现了等古潜山油田。生产实践不仅向人们展示了在碳酸盐岩中寻找油气资源的广阔前景，同时也提出了一系列有关碳酸盐岩储层急待解决的问题。因此油层物理除主要研究砂岩之外，碳酸盐岩的讨论也是极重要的。

油气是我们最感兴趣的研究对象，是主体。但是要研究油气就必须研究其居留于地下的空间，即居留的客观环境，因为其“环境”的好坏直接影响到油气储量的大小以及油气产出量的高低。

油气是储存于地下深处的储油气层（简称储层）中，因此研究储层就必须研究储层岩石骨架及储存于骨架孔隙中的流体（油、气和水）两个部分。本章着重讨论储层岩石骨架的各种性质。

由于岩石骨架的复杂性，以致其骨架颗粒的几何形状不可能用表示其边界曲面的方程来确定，我们只能采用某些能用实验的方法来测量的宏观（即平均）几何性质，如粒度组成、比面、孔隙度、渗透率等等作为实际描述或反映多孔骨架几何性质的参数。这种采用实验手段研究岩石整体宏观性质（而不是研究单个颗粒或孔隙）的方法，也是油层物理学科研究方法的一大特点。

我们先从岩石骨架的构成开始研究储层岩石，在此基础上进一步研究与渗流、储集、开采有关的岩石骨架的各种性质。这些性质包括：粒度组成、比面、孔隙度、饱和度、渗透率、压缩性、热学性质、电学性质、放射性、声学特性以及对上述性质影响较大的几种常见的敏感矿物。此外，本章还简要地讨论了储层敏感性（速敏、水敏、酸敏等）的评价问题。

储油岩石的性质直接影响油气储量和产量，油层物性资料对整个油藏的开发过程起着主要的控制作用。因此，它对认识储层、评价储层、保护和改造储层，对油田地质勘探、油田开发方案的制定以及提高油气采收率都有重大意义。同时，这些内容也是学好本课程中有关章节及其它课程所必备的基础知识。

## 第一节 储层岩石的骨架性质

对于砂岩类型的储层岩石，其骨架是由性质不同、形状各异、大小不等的砂粒经胶结而成。颗粒的大小、形状、排列方式、胶结物的成分、数量、性质以及胶结方式必将影响到储层的性质。而岩石的粒度和比面恰是反映岩石骨架构成的最主要指标，也是划分储层、评价储层的重要物性参数。本节主要讨论岩石的粒度和比面问题。

### 一、岩石的粒度组成

#### 1. 粒度组成的概念及其测定方法

粒度组成是指构成砂岩的各种大小不同颗粒的含量，通常以百分数来表示。因此，测定粒度组成的问题就归结为如何测定不同粒级颗粒占全岩颗粒的百分数问题。目前，粒度的测定方法较多，例如，对大颗粒（如砾石），可在野外直接测定；对于较致密的细粒岩石，可制成岩石薄片用显微镜观测和图像分析仪测定其粒度组成；更常采用的是将砂岩捣碎成单个的砂粒，再用筛析法和沉降法来测定储油气砂岩的粒度。

#### (1) 筛析法

这是一种常规的分析方法，已为各油田普遍采用。筛析法是用成套的筛子对经捣碎的岩石砂粒进行筛析，按不同粒级将它们分开（图 1-1）。筛子的筛孔有两种表示方法：一种是以英制每英寸长度上的孔数表示，称为目或号；另一种则是以毫米直径来表示筛孔孔眼的大小，目前两种都在使用。此外，成套筛子的孔眼大小有一定的规定，例如，相邻的两级筛孔孔眼大小可相差 $\sqrt{2}$ 或 $\sqrt{2}$ 的级差。

#### (2) 沉降法

通过最小筛孔（即最细一层筛子，400 目， $37\mu\text{m}$  孔径）筛下的颗粒常为极细的软泥。粘土颗粒若需再分其粒级的含量时，可采用沉降法。该法主要是确定岩样中小于  $72\sim 53\mu\text{m}$  的粒级含量。沉降分析法的原理是根据不同大小的颗粒在液体中具有不同的沉降速度。其大小可按照斯托克公式计算，即

$$v = \frac{gd^2}{18\gamma} \left( \frac{\rho_s}{\rho_L} - 1 \right)$$

故

$$d = \sqrt{\frac{18\gamma v}{g \left( \frac{\rho_s}{\rho_L} - 1 \right)}} \quad (1-1)$$

式中  $d$ ——颗粒直径，cm；

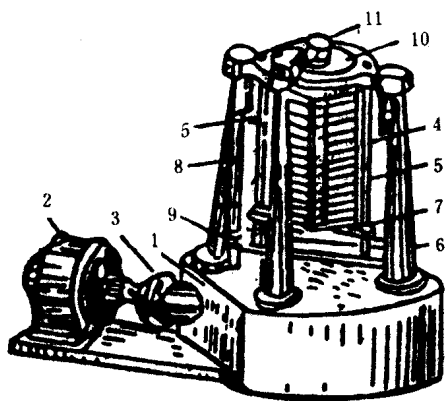


图 1-1 振动筛示意图

（据卡佳霍夫，1958）

- 1—机座；2—电动机；3—联接器；4—筛子；  
5—导柱；6—底盘；7—卡箍；8—小轴；  
9—卡箍上横梁；10—顶盖；11—撞击器

$v$ ——粒径为  $d$  的颗粒在液体中的下沉速度,  $\text{cm/s}$ ;

$\rho_s$ ——颗粒密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\rho_L$ ——液体密度,  $\text{g/cm}^3$ ;

$\gamma$ ——液体的运动粘度,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ;

$g$ ——重力加速度,  $981\text{cm/s}^2$ 。

在推导上述公式时, 斯托克曾作了如下假设: ①颗粒坚硬, 并具有光滑的球形表面; ②在粘性和不可压缩液体中颗粒的运动相当缓慢, 且距离容器壁及底为无穷远; ③颗粒沉降应以恒速进行; ④在运动着的颗粒与分散介质之间界面上, 不发生滑动等。因此, 该公式有一定的使用范围。研究表明, 当颗粒直径为  $50\sim 100\mu\text{m}$  时, 实测值具有足够的精度。此外, 颗粒的浓度对颗粒在分散液中下沉速度影响较大, 为保证颗粒在沉降时呈单粒分散下沉, 在测定时要求岩石颗粒在悬浮液中的重量浓度不得超过 1%。

从上式可看出, 当选定了悬浮液 (常用清水) 后, 式中  $\rho_L$  和  $\gamma$  便为已知, 颗粒密度  $\rho_s$  可用比重瓶等方法测得。因此, 只需要测定颗粒在液体中的下降速度  $v$ , 便可按 (1-1) 式求得相应的颗粒直径  $d$ , 并测出相应于直径  $d$  的颗粒含量。

应该指出的是, 筛析法和沉降法所得出的粒径  $d$  并不是一个定值, 而是一个范围, 其平均直径  $\bar{d}$  应比上一级筛孔的直径  $d'_i$  小, 又比下一级筛孔的直径  $d''_i$  大, 该平均粒径可用下式求得

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

式中  $\bar{d}_i$ ——颗粒的平均直径;

$d'_i, d''_i$ ——分别为相邻的两层筛子的孔眼直径。

那么, 在求得某一粒级的颗粒及其重量后, 又如何表示其粒度呢?

### 2. 粒度组成的表示方法

粒度的表示方法有两种: 数字列表法和作图法。作图法具有直观明了的优点, 可以比较清楚地了解岩石粒度的均匀程度, 以及颗粒按大小分布的特征, 是常用的表示粒度组成的方法。

作图法可以根据坐标取值方法及表示不同的参数, 采用不同的图式, 如: 直方图、累积曲线图、频率曲线图和概率曲线图等。粒度组成分布规律大多为正态或近似正态分布。目前矿场上常用的是前两种图, 即粒度组成分布曲线 (图 1-2) 和粒度组成累积分布曲线 (图 1-3)。

粒度组成分布曲线表示了各种粒径的颗粒所占的百分数, 可用它来确定任一粒级在岩石中的含量。曲线尖峰越高, 说明该岩石以某一粒径颗粒为主, 即岩石粒度组成越均匀; 曲线尖峰越靠右, 说明岩石颗粒越粗。一般储油砂岩颗粒的大小均在  $1\sim 0.01\text{mm}$  之间。

粒度组成累积分布曲线也能较直观地表示出岩石粒度组成的均匀程度。上升段直线越陡, 则说明岩石越均匀。该曲线最大的用处是可以根据曲线上的一些特征点来求得粒度参数, 进而从定量上来表示岩石粒度组成的均匀性。

### 3. 粒度参数的计算

从定量上有几种可用来表征岩石组成均匀程度的系数或参数。

### (1) 不均匀系数 $a$

指累积分布曲线上某两个重量百分数所代表的颗粒直径之比值。常用累积重量 60% 的颗粒直径  $d_{60}$  与累积重量 10% 的颗粒直径  $d_{10}$  之比, 即

$$a = d_{60} / d_{10} \quad (1-3)$$

显然, 不均匀系数越接近于 1, 则表明粒度的组成越均匀, 一般储层岩石的不均匀系数在 1~20 之间。不均匀系数小于 2 的土壤可视为均质土。

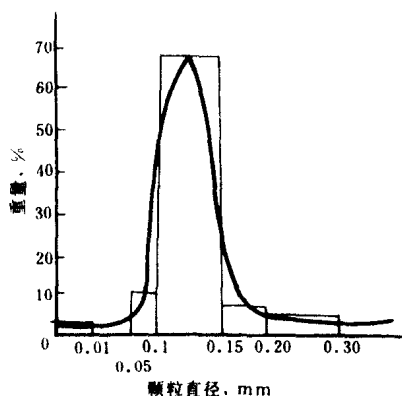


图 1-2 粒度组成分布曲线  
(据卡佳霍夫 1956)

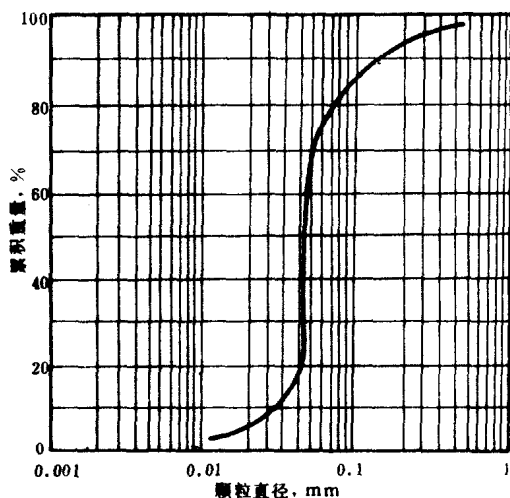


图 1-3 粒度组成累积分布曲线  
(据卡佳霍夫, 1956)

### (2) 分选系数 $S$

欧美国家往往以累积重量 25%, 50%, 75% 三个特征点, 将累积曲线划分为四段, 然后按特拉斯克方程求出分选系数, 即

$$S = \sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}} \quad (1-4)$$

式中  $d_{25}$ ——累积分布曲线上, 25% 处的粒级直径;

$d_{75}$ ——累积分布曲线上, 75% 处的粒级直径。

按特拉斯克规定:  $S=1\sim2.5$ , 分选好;  $S=2.5\sim4.5$ , 分选中等;  $S>4.5$ , 分选差。

### (3) 标准偏差 $\sigma$

用标准偏差  $\sigma$  的大小来划分岩石分选性的等级, 是由福克、沃德提出的, 其计算公式为

$$\sigma = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6.6} \quad (1-5)$$

式中  $\phi_i$ ——第  $i$  种粒级处对应于以 2 为对数曲线上所取值，按下式计算， $\phi_i = -\log_2 d_i = \log_2 \frac{1}{d_i}$ ；

$d_i$ ——第  $i$  种粒级处的颗粒直径。

由标准偏差的计算公式 (1-5) 可看出，这种方法既包括了粒度组成累积分布曲线的绝大部分 ( $\phi_{16} \sim \phi_{84}$ )，也包括了曲线中的最开始和最后的尾部处的粒级直径 ( $\phi_{95}$  和  $\phi_5$ )，用该参数评价岩石颗粒的分选性是比较理想的。正因为如此，福克、沃德参数是我国目前应用最广泛的粒度参数之一。

根据标准偏差来划分岩石的分选等级示于表 1-1 中，偏差  $\sigma$  愈小，岩石分选性愈好。

表 1-1 按标准偏差划分的分选等级 (据福克和沃德, 1957)

| 福克、沃德标准偏差 ( $\sigma$ ) | 分选等级 |
|------------------------|------|
| $< 0.35$               | 分选极好 |
| $0.35 \sim 0.50$       | 分选好  |
| $0.50 \sim 0.71$       | 分选较好 |
| $0.71 \sim 1.00$       | 分选中等 |
| $1.00 \sim 2.00$       | 分选差  |
| $2.00 \sim 4.00$       | 分选很差 |
| $\geq 4.00$            | 分选极差 |

有关福克、沃德粒度参数的其它计算公式，如计算平均值、偏度、峰态等，此处从略。

对于碳酸盐岩如灰岩和白云岩等，由于其骨架颗粒，胶结物及孔隙充填物基本上都是同样的物质，事实上无法将它们分为单个的颗粒，故对于碳酸盐岩不讨论其粒度问题。

## 二、岩石的比面

粒度组成是表示岩石骨架分散性的一种指标，组成砂岩的砂粒越细，则表明其骨架分散程度越高。除了粒度组成这一指标外，还可以用岩石的比面来描述储层岩石骨架的分散程度。

### 1. 比面的概念及研究它的意义

所谓比面是指单位体积岩石内岩石骨架的总表面积或单位体积岩石内总孔隙的内表面积。当颗粒间是点接触时，即为所有颗粒的总表面积。比面的数学表达式为

$$S = \frac{A}{V} \quad (1-6)$$

式中  $S$ ——岩石比面， $\text{cm}^2/\text{cm}^3$  或  $1/\text{cm}$ ；



$A$ ——岩石颗粒的总表面积或岩石孔隙的总内表面积,  $\text{cm}^2$ ;

$V$ ——岩石外表体积 (或视体积),  $\text{cm}^3$ 。

举例来说, 由半径为  $R$  的等圆球按立方体排列所组成的多孔介质, 其比面应为  $S = 8 \times 4\pi R^2 / (4R)^3 = \pi / 2R$ 。因此, 细颗粒物质的比面显然要比粗颗粒物质的比面大得多, 如砂岩 (粒径为  $1 \sim 0.25\text{mm}$ ) 其比面小于  $950\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ; 细砂岩 (粒径为  $0.25 \sim 0.1\text{mm}$ ) 比面为  $950 \sim 2300\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ; 泥砂岩 (粒径为  $0.1 \sim 0.01\text{mm}$ ) 其比面大于  $2300\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ 。岩石比面越大, 说明其骨架的分散程度越大, 颗粒越细。为此, 有人提出按比面的大小将岩石进行分类。

比面的大小对流体在油藏中的流动影响很大, 它可以决定岩石的许多性质。由于岩石骨架表面对流体流动范围起着边界的作用, 对岩石与流体接触时所产生的表面现象及流体在岩石中的流动阻力大小, 岩石的渗透性以及骨架表面对流体的吸附量等都具有重要影响。

岩石比面的大小受粒径、颗粒排列方式及颗粒形状等因素的影响。例如, 扁圆形颗粒的比面要比圆球形颗粒大; 颗粒间胶结物含量少的要比胶结物含量多的比面大。

此外, 需要提及的是, 在有关比面的定义中, 其分母也有采用“单位重量”来定义比面的。例如, 对于砂岩, 按单位重量定义的比面为  $500 \sim 5000\text{cm}^2 / \text{g}$ , 而对页岩为  $100\text{m}^2 / \text{g}$  ( $1000000\text{cm}^2 / \text{g}$ )。

在实际应用和公式推导中, 也有将比面定义中的分母采用不同的体积来定义。例如, 除常以岩石外表体积  $V$  定义外, 还采用颗粒骨架体积  $V_s$  和孔隙体积  $V_D$  为基准的三种比面, 即

$$S = \frac{A}{V}; \quad S_s = \frac{A}{V_s}; \quad S_D = \frac{A}{V_D} \quad (1-7)$$

式中  $S$ ——以岩石外表体积为基准的比面,  $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ;

$S_s$ ——以岩石骨架体积为基准的比面,  $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ ;

$S_p$ ——以岩石孔隙体积为基准的比面,  $\text{cm}^2 / \text{cm}^3$ 。

因为

$$\phi = V_p / V; \quad V_p = \phi \cdot V; \quad V_s = (1 - \phi) V \quad (1-8)$$

由此可得出按以上三种不同体积定义的比面关系:

$$S = (\phi \cdot S_p + (1 - \phi) S_s) \quad (1-9)$$

一般情况下, 如果未加注明, 岩石比面是指以岩石外表体积为基准的比面。

## 2. 比面的测定

比面的测定有直接法和间接法两种。岩石的性质 (如胶结情况) 不同, 采用的方法也不同。不同的方法, 所得结果也会不同, 因为用不同的方法测量的是意义不同的比面。在任何情况下, 我们都应当根据岩石的实际情况, 按照所要解决的问题来选择比面的定义及测量方法。下面介绍几种测定比面的方法。

### (1) 透过法

根据流体对岩石（或其它粉末颗粒层）的透过性来求比表面积的方法称为透过法。以空气作为流体的空气透过法较为常用。对较粗的、且遇水不分散的和不膨胀的颗粒，也可用水作为流体。

假设岩石中的流体通道为连续的颗粒间隙，即毛管束，流体以层流状态通过其中时，被润湿了的管壁面积即为岩石的表面积。流体通过时的压力降  $\Delta p$  可由实验时测得的水柱压差  $H$  代替。

这种基于流体流动的方法最初由高才尼（Kozeny）1927 年提出，以后又为一些研究者如卡尔曼（Carman）所修正，最后推导出表征渗透率和比面的关系式为

$$K = \frac{\phi^3}{kS^2} \times 10^8 = \frac{\phi^3}{kS_s^2 (1-\phi)^2} \times 10^8 = \frac{\phi}{kS_p^2} \times 10^8 \quad (1-10)$$

式中  $K$ ——岩石的渗透率， $\mu\text{m}^2$ ；

$S$ ——以岩石外表体积为基准的比面， $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ；

$S_s$ ——以岩石骨架体积为基准的比面， $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ；

$S_p$ ——以岩石孔隙体积为基准的比面， $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ；

$k$ ——高才尼常数， $k=2.5 \times 1.4 \times 1.4$ ，常取为 5。

从高才尼方程可以看出，岩石的比面越大，则渗透率就越小，这就是为什么一般泥质砂岩、粉砂岩渗透率很低的缘故。

将式（1-10）与气测岩石渗透率的公式

$$K = \frac{2p_0 Q_0 \mu L}{A (p_1^2 - p_2^2)} \approx \frac{Q_0 \mu L}{AH} \times 10^5 \quad (1-11)$$

联立，经量纲转换后，可导出计算岩石比面的公式<sup>●</sup>，即

$$S = 14\sqrt{\phi^3} \sqrt{\frac{AH}{Q_0 \mu L}} \quad (1-12)$$

式中  $S$ ——以岩石外表体积为基准的比面， $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ；

$\phi$ ——岩心孔隙度，小数；

$A$ ——岩心截面积， $\text{cm}^2$ ；

$L$ ——岩心长度， $\text{cm}$ ；

$Q_0$ ——通过岩心的空气量，它相当于从马略特瓶中流出的水量， $\text{cm}^3/\text{s}$ ；

$\mu$ ——室温下空气的粘度， $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ；

$H$ ——空气通过岩心稳定后的压差， $\text{cm}$  水柱。

式（1-12）的推导过程读者可在了解有关孔隙度、渗透率的概念之后，参见附录 I。

由式（1-12）看出，当已知岩心的孔隙度  $\phi$ ，岩心几何尺寸面积  $A$ 、长度  $L$  及空气粘度  $\mu$ ，只要实验时测出压差  $H$  及相应的流量  $Q_0$ ，即可按上式计算出岩石比面。

● 公式推导见附录 I。