



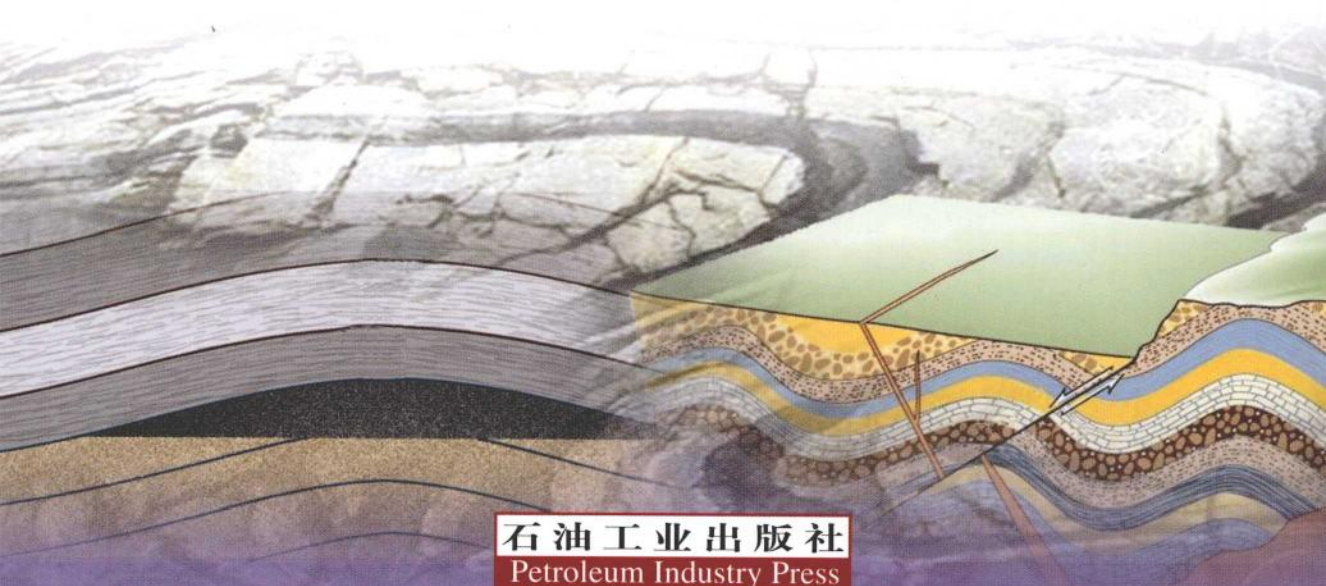
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

油层物理

(第二版)

何更生 唐海 主编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校石油天然气类规划教材

油 层 物 理

(第二版)

何更生 唐 海 主编

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书主要包括储层岩石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原油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，唐海主编. —2 版.

北京：石油工业出版社，2011.6

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978-7-5021-8424-7

I. 油…

II. ①何… ②唐…

III. 油层物理学-高等学校-教材

IV. TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 078904 号

出版发行：石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址：www.petropub.com.cn

编辑部：(010) 64240656 发行部：(010) 64523620

经 销：全国新华书店

印 刷：石油工业出版社印刷厂

2011 年 6 月第 2 版 2011 年 6 月第 15 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：24.25

字数：620 千字

定价：36.00 元

(如出现印装质量问题，我社发行部负责调换)

版权所有，翻印必究

第二版前言

本教材是在何更生教授编写的《油层物理》教材的基础上,结合当今油层物理基础学科的发展,做了适当补充和修订。它可作为石油工程、石油地质及油田应用化学专业《油层物理》课程的教科书,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,石油勘探及开发各学科发展很快,尤其是油气藏评价、油气藏数值模拟、油气渗流力学、提高石油采收率等各项技术的快速发展以及低(特低)渗等特殊油气藏的有效勘探与开发,更加促进了油层物理这门基础学科的发展。因此需要有新教材来反映该学科近年来的成就,以满足读者由浅入深、循序渐进地学习石油工程基础知识,作者在编写这本教材工作中,力求作好这方面的尝试。

本教材主要介绍了油气藏开发工程所涉及的岩石流体物理化学现象、物理过程以及物理量之间的关系,包括油藏储层岩石的物理性质、油藏流体的物理性质、多孔介质中流体与岩石相互作用的多相渗流机理及其在石油工程中的应用。重点介绍基本概念、基本理论、基本方法,注重广度。通过学习,可以掌握基本物理参数的概念、定义,掌握物理现象、过程的影响因素、工程应用,掌握物理参数的测试原理、测定方法。通过学习使学生掌握本课程的基本知识框架,为学习后续课程以及从事油气田开发、开采工作打下良好的基础。

本书是按48学时编写的,限于篇幅,有些内容未能深入展开论述,有兴趣的读者可参考有关专著或相关文献。使用时应按教学要求突出重点,不必面面俱到。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。

本书第二版由唐海统稿,何更生主审阅,孙良田主审。孙雷、段永刚和王建分别参加了有关章节内容的增补和修订。在改编过程中得到了西南石油大学领导以及石油工程学院老师们的支持与帮助。在此,感谢西南石油大学教材建设委员会的大力支持。同时本书还得到了成都理工大学伊向艺以及西南油气田分公司周克明的支持,提出了不少宝贵意见。作为一本专业基础教科书,本书继承了国内外石油院校各个历史时期《油层物理》教材的优点和精华,参考了许多正式和未正式出版的相关教材及科技文献,有的未能在参考文献中列出,在此一并表示感谢。

由于学科发展很快,很多方面都在推陈出新,限于编者水平,有些新技术和新方法难以完全反映在本教材的内容中,难免存在这样或那样的不足和错误,请同行和读者批评指正。

编者

2011年2月

第一版前言

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、循序渐进、符合认识论的要求，作者正试图努力做这方面的尝试。

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炳光、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，在此一并表示感谢。

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

1993年11月

目 录

绪论	1
第一章 储层岩石的物理特性	5
第一节 多孔介质分类	6
第二节 储层岩石的骨架性质	7
第三节 岩石的孔隙结构及孔隙性	17
第四节 储层岩石孔隙中的流体饱和度	45
第五节 储层岩石的渗透性	53
第六节 储层物性参数平均值计算方法	78
第七节 储层岩石的敏感性	85
第八节 储层岩石的其他物理性质	101
习题	114
参考文献	119
第二章 油气藏流体的物理特性	121
第一节 油气藏烃类的相态特征	121
第二节 天然气的高压物性	133
第三节 地层原油的高压物性	159
第四节 地层水的高压物性	175
第五节 油气藏流体高压物性的实验测定	183
第六节 油气藏流体高压物性的相平衡模拟计算	200
第七节 地层流体高压物性参数应用示例*	220
习题	223
参考文献	225
第三章 多相流体的渗流机理	227
第一节 储层岩石中各种界面现象的回顾	227
第二节 储层岩石的润湿性	240
第三节 储层岩石的毛管压力曲线	255
第四节 储层岩石驱油过程中的阻力效应	296
第五节 储层岩石的有效渗透率和相对渗透率曲线	304
习题	335
参考文献	339

第四章 提高原油采收率机理..... 342

第一节 提高原油采收率的基本概念..... 342

第二节 影响原油采收率的因素..... 348

第三节 残余油饱和度的分布及测定方法..... 352

第四节 化学驱油法..... 357

第五节 气体混相驱油法..... 365

第六节 热力采油法..... 372

习题..... 376

参考文献..... 377

附录..... 379

附录 I 公式 (1-15) 的推导 379

附录 II 公式 (1-130) 的推导..... 381

绪 论

一、学习油层物理课程的重要意义

能源是一个国家社会发展的动力源泉，决定着一个国家的经济发展、竞争实力和综合国力。作为重要的能源、优质的化工原料和重要的战备物资，被称为黑色金子的石油及天然气是当今世界各国必不可少的主要能源和物资，其开发和合理利用受到各国的普遍重视。

新中国成立 60 年来，我国石油工业从新中国成立前年产不足 $9 \times 10^4 \text{t}$ ，发展到 1978 年年产突破 $1 \times 10^8 \text{t}$ ，近年来年产 $(1.6 \sim 1.7) \times 10^8 \text{t}$ ，进入世界产油大国行列。但从 1997 年起，我国已成石油净进口国，进入 21 世纪以来，石油年进口量已超过亿吨，成为世界第二大石油消费国。按照国家社会经济发展规划，今后我国对油气资源的需求量还将持续增加。因此，我国石油产量要满足国民经济现代化及可持续发展的需求，必须：(1) 寻找新的油气田，扩大油气后备储量；(2) 采用先进技术，最大限度地合理开发油气藏；(3) 提高现有油气田的油气采收率，增加油气产量；(4) 开展国际合作，参与开发国际油气资源，满足我国石油工业利用国内、国外“两种资源、两个市场”的需要；(5) 采取各种节能措施及开发可替代能源或新能源，减缓对石油需求的压力。对于将要从事石油勘探开发的工作者来说，必须通晓和掌握寻找油气资源、增加油气产量所必需的知识，才能面向 21 世纪，为我国石油工业的发展贡献力量。

《油层物理》是石油工程专业必修的一门重要的专业基础课，也是资源勘查工程专业一门重要的基础课程。它是一门建立在实验基础上、实践性很强的课程，是学好其他后续专业课程如渗流力学、油藏工程、油藏数值模拟、采油工程、试井分析、保护储层技术、天然气工程、提高采收率等的非常关键的专业基础课程。课程主要目标为：(1) 掌握有关储层岩石和储层流体的基本物理性质以及多相流体在储层岩石中的基本渗流机理；(2) 培养学生在油气田开发方面的实验动手能力；(3) 培养学生分析和解决实际问题的能力。

二、油层物理的研究内容与任务

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。主要包括：

(1) 储油 (气) 岩石的物理性质 (包括孔隙度、渗透率、饱和度、储层敏感性等)。地下油 (气) 储集体是岩石骨架内的孔隙空间，岩石骨架的物理性质以及岩石骨架内孔隙空间的物理性质与地面常见的流体储集容器有着本质的不同，地下储油 (气) 多孔介质岩石的性质决定着油、气、水在油藏岩石中的分布和流动规律，是油田开发的岩石物理基础，是油田开发理论研究的重要课题。

(2) 油气藏中流体的物理性质 (包括油、气、水的高压物理性质及油气体系相态特征)。原油在地下处于高温高压状态，且溶解有大量伴生天然气，其性质与地面原油有很大的差

异。油气藏开发过程中，油、气、水物理性质及油气体系相态特征，是油田开发的流体物理基础，也是油田开发理论研究的重要课题。

(3) 油气藏中多相流体与岩石相互作用的物理性质及多相渗流机理。储油（气）岩石与地下油、气、水流体间的复杂接触关系，直接影响油气藏中流体分布、渗流机理和流动规律，是油田开发的渗流物理基础，同样是油田开发理论研究的重要课题。

油层物理的知识贯穿于油气藏开发的全过程。在开发初期，用于获取流体物性、岩石物性资料，判断油气藏类型，为制订油田开发方案和设计服务。开发过程中，与时俱进地进行开发动态分析、方案调整等工作，也需要油层物理知识。开发后期，研究剩余油分布、提高采收率措施等更离不开这些知识。

三、油层物理的发展概况与发展水平

油层物理是一门比较年轻的学科，20 世纪 30 年代，美国、苏联等国家从事油气田开发的人员，注意到了油藏流体的特性及影响，初步进行了流体性质的测试及测定方法研究。30 年代，苏联已有这方面的专著，但油气层物理作为一门学科是以 1949 年美国 M. 马斯盖特发表的《采油物理原理》作为一个开端，该书汇总了 20 世纪上半叶关于储油岩石和油、气、水流体性质的研究与实践资料，概括并提升到物理学高度予以描述与解释。50 年代，苏联莫斯科石油学院 Ф. H. 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，使油层物理基础成为一个新的学科分支。随后这门学科得到了更广泛更深入的发展，我国和世界上其他国家如美国、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，尽管书名不同（如油藏工程基本原理等），但内容大体一致。国外的几本标志性的著者为：(1) 70 年代，G. V. 奇林加等（1972）出版《碳酸盐岩石油天然气开采》，从开采角度叙述了碳酸盐岩储层特征，较系统和较全面地叙述了碳酸盐岩储层及其物理性质；D. 威廉等（1973）出版的《石油流体性质》，比较系统阐述了石油和天然气的物理化学性质和有关计算；苏联学者斯麦霍夫的出版的《裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法》，专门探讨裂缝性储集层形成机理及其油气储量计算；1977 年卡佳霍夫及其助手新著《油气层物理学》，对储油（气）岩石的性质和孔隙结构有了新的概括和总结；И. Л. 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，强调要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。(2) 80 年代的发展主要是在碳酸盐岩储层、碎屑岩、次生孔隙、油气流体的非牛顿性和相态方程应用等方面，实验测试技术和电算技术应用也有了新的发展。(3) 90 年代以来不论是理论研究的深度还是广度上，都进入了一个崭新的阶段，研究成果和文献数量很多。

我国油层物理学科是 20 世纪 50 年代前后形成的，且油层物理教学和科研专业人员队伍随着油田开发而不断发展壮大。油层物理学科起步是以聘请前苏联专家 И. K. 吉玛都金诺夫在我国第一所高等石油院校（北京石油学院）首次开设《油层物理》课程，并开始培养研究生为标志，伴随着东部几大油田的相继发现与开发，先后在北京和各大油田建立了研究院所、建立了有关油层物理的各类实验室，开展各方面的油层物理试验研究和油田开发试验研究，以及提高油藏原油采收率的各种方法试验研究，取得了一批批研究成果，使我国油层物理科学研究不断前进。60 年以来，我国相继出版的反映油层物理最新研究成果的几本标志性的著者为：洪世铎（1985）的《油藏物理基础》，罗蛰潭（1985）的《油层物理》，张博全

等(1989)的《油气层物理》,何更生(1994)的《油层物理》,杨胜来(2004)的《油层物理学》,王允诚(2006)的《油层物理学》等,在各种杂志上发表的相关文章就更多了。

经过国内外几代学者的努力,已经形成比较完善的理论体系,实验测试技术也趋于规范化。在内容上,油层物理从岩石基本性质(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。在试验分析上,从常规岩心分析发展到专项岩心分析、动静态试验、提高采收率试验、地层敏感性流动试验、地层流体分析等,并形成了比较定型的规范和流程。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,目前国内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,国内形成了一批行业标准(SY/T 5336—2006《岩心分析方法》);分析方法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,国内外比较先进的服务性实验室,多用计算机采集、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,形成了静态分析试验和动态分析试验标准系列。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,在上覆压力下的孔隙度、渗透率测定以及润湿性测定。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;为研究渗流规律的流体渗流启动压力梯度试验;为保护储层的储层伤害评价试验;为有效勘探开发低渗致密油气藏而开展的流体赋存状态评价试验。总的来看,专项岩心分析项目不断向前发展,其测试方法逐渐成熟。

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体系,并按各自比较定型的流程进行分析。在有关相态研究中,与提高采收率技术相结合(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,在不同压力与温度、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。

然而,我们也将看到,由于油藏岩石和流体的非均质性和油层物理现象的复杂性,有些现象还没有成熟的认识,有些还不能很好地解释和描述。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给油层物理提出了新的研究课题,随着对实际问题的深入研究,油层物理必将继续发展、进步、深化,并将体现以下特点:(1)综合性:学科间的互相渗透、互相配合而形成新的边缘理论。(2)创新性:应用新理论,解决新问题。(3)工程性:测试和实验将更真切地模拟油层的实际条件和开发过程。

如今,油层物理已成为我国油田开发中不可缺少的理论基础。随着油气田开发难度的增加,以及深部油气藏、高含水油藏、低渗油气藏的开发,它必将在我国油田开发工作中发挥

更重要的作用。

四、本课程的目的与学习方法

油层物理是高等石油院校石油工程专业、油田化学专业、地质专业的一门重要专业基础课，是研究油（气）层物理和物理化学现象的科学，它既要运用数学、物理、化学基础知识，普通地质、岩石学、物理化学以及流体力学等许多基础理论，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）工程等专业课程中又是以它为基础进行广泛的论述及应用。

油层物理是一门建立在实验基础上，理论与实践并重的课程，实验是油层物理研究方法的一大特点。不进行实验、不熟悉实验，就不可能牢固掌握油层物理的知识。因此，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，要求教学工作中重视实验教学和习题课，通过实验和习题，掌握有关实验和计算技能，达到巩固和深化课堂理论教学的目的。

本书以法定单位制为主，同时介绍常用工程单位，引用的个别例题仍保留原用的欧美单位制，读者务必掌握公式的单位制及其应用。

第一章 储层岩石的物理特性

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——油气储集层（简称储层）。油气是储存于地下深处的储油气层中，研究储层就必须研究储层岩石骨架、储存于骨架孔隙中的流体（油、气和水）以及流体在孔隙中的渗流机理三个部分。本章着重讨论储层岩石骨架的各种性质。

石油与天然气储层是指埋藏在地下深处的多孔岩层，地下多孔岩层的储集空间结构、性质等特征决定了油气的赋存特点、油气储量与储量丰度、油气井产能以及油气资源开发的难易程度和开发效果。研究和掌握油气储层的物理性质是认识储层、评价储层、保护和改造储层的基础，是从事油气勘探、钻井、开发与开采以及提高油气采收率工作所必须掌握的基础知识。

沉积岩储集层是地下石油与天然气的主要储层，世界上已发现的油气储量 99% 以上集中在沉积岩储集层中，而沉积岩储集层中又以碎屑岩和碳酸盐岩储集层为主（表 1-1）。

表 1-1 储层岩石的分类与国内典型油气田实例

沉积类型	岩性	分 类	典型油气田举例
碎屑岩	砂岩	疏松砂岩	萨尔图油田、胜坨油田、涩北气田
		粉砂岩	文东油田
		致密砂岩	枣园油田、靖安油田
		裂缝性砂岩	延长油田
	砾岩	砾岩	克拉玛依油田
	砂砾岩	砂砾岩	曙光油田
		裂缝性砂砾岩	蒙古林油田
	泥岩	孔隙缝洞泥灰岩	南翼山油田
碳酸盐岩	白云岩	裂缝孔洞白云岩	任丘油田
		裂缝孔隙泥质白云岩	风成城油田
	石灰岩	裂缝孔洞灰岩	苏桥油田、塔河油田
		生物灰岩	桩西油田
		孔隙裂缝藻灰岩	义东油田
	火成岩	裂缝孔隙安山岩	风化店油田
		裂缝性凝灰岩	哈达图油田
		火山岩	车排子油田、石西油田
		玄武岩、安山岩	克拉玛依油田 417 断块
	变质岩	裂缝性变质岩	鸭儿峡油田
		裂缝性花岗岩	静安堡油田

碎屑岩储集层是世界含油气区的主要储集层，它具有分布广、物性好的特点。碎屑岩储集层包括各种类型砂岩、砾岩、砂砾岩、泥岩以及没有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。因此，碎屑岩是油层物理必须研究讨论的储层岩石。

碳酸盐岩储集层也是重要的油气储集层。根据全球资料统计，约一半的世界油气储量存在于碳酸盐岩储集层中，达到世界油总产量的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口井产自碳酸盐岩储集层。以产油著称的波斯湾盆地是世界碳酸盐岩油田分布最集中的地区。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2000多年的勘探和开发历史；在油田方面，我国继川中大安寨碳酸盐岩油田发现之后，在河北任丘等地发现了古潜山油田，在塔里木盆地发现了塔河油田。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亟待解决的问题。因此，油层物理除主要研究砂岩外，碳酸盐岩储集层也是极为重要的研究对象。

由于岩石骨架的复杂性，以致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，只能采用某些实验的方法测量其宏观（即平均）几何性质，如粒度组成、比面、孔隙度、渗透率等，作为描述或反映多孔骨架实际几何性质的参数。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敏感矿物及其储层各种敏感性（速敏、水敏、酸敏、碱敏、盐敏和体积敏感性等）的评价问题。同时，这些内容也是学好本课程中有关章节及其他课程所必备的基础知识。

第一节 多孔介质分类

由于实际岩石的颗粒大小、圆度等不尽相同，孔隙、裂缝或溶洞也极不规则，因此要研究岩石的某些物理特性是十分困难的，有的甚至是不可能的。但是，我们可以根据多孔介质储集空间的特点，把复杂的真实多孔介质简化为几类简单的孔隙介质模型及其相互组合模型。长期的实践表明，利用简化的多孔介质模型分析（或解释）某些物理概念是比较易于被人们所接受的，分析生产和科研中的实际问题，也可以获得比较令人满意的结果。

一、均质与非均质

根据研究和分析的不同需要，人们可假设出不同的多孔介质岩石模型。例如，根据岩石物性参数的分布情况可将储层岩石分为均质、非均质岩石。

1. 均质多孔介质岩石

均质多孔介质岩石是指研究的整个多孔介质岩石空间内，任意空间点上岩石的所有物理性质参数（或所讨论的物理性质参数）均相等的多孔介质岩石。

2. 非均质岩石

非均质岩石是指研究的整个多孔介质岩石空间内，任意空间点的任一个物理性质参数或所有的物理性质参数都不相等的多孔介质岩石。这种多孔介质岩石模型比较符合实际，但研究起来比较困难。因此，有时也只能讨论其中一个或几个物理性质参数的规律性变化情况。事实上，非均质岩石是真实多孔介质岩石的简化，但有时多孔介质岩石的非均质性和油藏的

非均质性是有区别的两个概念。岩石的非均质性是指岩石自身的非均质特性，而油藏的非均质性包括岩石和流体两部分的非均质特性，即油藏的非均质性是指储层岩石和流体物理特性随位置不同而变化，它是由于沉积、褶皱、断层、油层岩性后期沉积变化和流体类型、特性的变化而引起的。

二、多孔介质类型

岩石就是一种多孔介质。在油气勘探与开发过程中涉及的多孔介质，在许多情况下都是指地下储油气层岩石或天然岩石。常见的多孔介质类型主要有以下几种。

1. 孔隙介质

以固体颗粒为骨架，在颗粒之间形成连通的孔隙，即粒间孔隙。如砂岩、粘土都可称为孔隙介质。

2. 裂缝介质

由于地壳运动和构造应力等的作用，可能在岩层中形成形态各异、大小不一的裂缝。这种具有裂缝的多孔介质就称为裂缝介质。在纯裂缝介质中，油气的储集与流动仅发生在裂缝中。

3. 溶洞介质

由沉积过程及成岩后的溶解作用而形成孔隙（例如晶间孔隙、溶洞孔隙和洞穴孔隙等）。具有这种经溶解作用而形成的孔隙多孔介质常称为溶洞介质，例如碳酸盐岩岩层多具有这种孔隙。晶间孔隙一般直径约为 $0.06\text{mm}\sim 0.1\text{cm}$ ；而洞穴孔隙一般直径为 1cm 以上。在钻探过程中，遇上洞穴常发生“放空”现象。

4. 裂缝—孔隙介质

把既有裂缝存在又有粒间孔隙存在的多孔介质称为裂缝—孔隙介质。这种裂缝—孔隙介质是普遍存在的，只是有的介质中裂缝很小，被视为孔隙介质，而有的介质中粒间孔隙远小于裂缝孔隙，而被视为裂缝介质。

5. 裂缝—溶洞介质

把既有裂缝存在又有溶洞孔隙和洞穴孔隙存在的多孔介质称为裂缝—溶洞介质。

6. 溶洞—孔隙介质

把既有溶洞孔隙和洞穴孔隙又有粒间孔隙存在的多孔介质称为溶洞—孔隙介质。

第二节 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。岩石的粒度和比面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

粒度是指构成砂岩的各种大小不同颗粒的直径，用目或毫米表示。粒度组成是指构成砂岩的各种大小不同颗粒的重量占岩石总重量的百分数。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重量和全岩颗粒重量的问题。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，可制成岩石二维薄片用显微镜观测（目测法）和用图像分析仪测定其粒度组成（图像分析法）；也可以采用激光衍射测定并分析粒度。但目前最直接、最常用的是在实验室直接测定。

1) 直接法

直接法常采用的是用橡皮锤将砂岩捣碎，分开成单个的砂粒，再用筛析法和沉降法来测定储油气砂岩的粒度。

(1) 筛析法。

筛析法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橡皮锤捣碎的砂岩单个砂粒进行筛析，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。而砂粒直径（cm）= 2.54cm / （每英寸长度上的孔数）。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。筛析法分析中，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 $\sqrt[4]{2}$ 的级差。

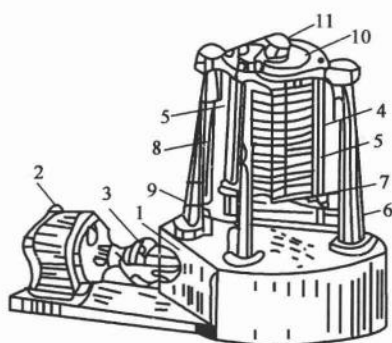


图 1-1 振动筛示意图（据卡佳霍夫，1958）

- 1—机座；2—电动机；3—连接器；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

筛析法分析粒度组成的计算公式为：
留在每个筛网上的样品% = （载有样品的该筛网质量 - 该筛网空质量） / 总样品质量 × 100
留筛总量% = 每个筛网上留下的样品百分数的总和（从最大筛网到底盘包括的每个尺寸的筛网）

该方法试验简单，用很少的设备就可进行试验，适用于胶结较差的砂岩，对粒径大于 0.44mm

的颗粒进行分类时，该方法是标准的，准确的。也可以对样品重新组合对试验结果进行重复性试验。值得注意的是，在将砂岩捣碎时，要求既能将各颗粒分开，但又不可将颗粒破碎。

该方法试验简单，用很少的设备就可进行试验，适用于胶结较差的砂岩，对粒径大于 0.44mm

的颗粒进行分类时，该方法是标准的，准确的。也可以对样品重新组合对试验结果进行重复性试验。值得注意的是，在将砂岩捣碎时，要求既能将各颗粒分开，但又不可将颗粒破碎。

的颗粒进行分类时，该方法是标准的，准确的。也可以对样品重新组合对试验结果进行重复性试验。值得注意的是，在将砂岩捣碎时，要求既能将各颗粒分开，但又不可将颗粒破碎。

(2) 沉降法。

沉降法又称斯托克定律分析方法。通过最小筛孔（即最细一层筛子，400 目，37μm 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，可采用沉降法。该法主要是确定岩样中小于 53~72μm 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。其大小可按斯托克公式计算，即：

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

故

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

式中 d ——颗粒直径，cm；

v ——粒径为 d 的颗粒在液体中的下沉速度，cm/s；

ρ_s ——颗粒密度，g/cm³；

ρ_L ——液体密度，g/cm³；

γ ——液体的运动粘度，cm²/s；

g ——重力加速度, 981cm/s^2 。

在推导以上公式时, 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质量浓度不得超过 1% 。

从式 (1-1) 可看出, 当选定了悬浮液 (常用清水) 后, 式中 ρ_L 和 γ 便为已知, 颗粒密度 ρ_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 便可按式 (1-1) 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, 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 ——相邻的两层筛子的孔眼直径。

2) 间接法

间接法包括岩石薄片显微镜观测法、粒度薄片图像分析法和激光衍射测定法等。

岩石薄片显微镜观测法是将岩样粘在玻璃载片上, 并研磨到大约 $30\mu\text{m}$ 的厚度 (这个厚度使透射光能透过大多数砂岩颗粒)。通过测量二维薄片的单个颗粒横截面的长轴尺寸来确定粒径大小。该方法适用于大多数砂岩和粗粉砂岩, 疏松砂岩至胶结良好的砂岩样品的粒度分析, 测量范围一般是 $10\sim 400$ 目。但该方法对细小颗粒 (粉砂和粘土颗粒) 的测量精度受限, 试验结果重复性不好, 也不能直接分析平均值和粒度分布, 耗时, 且仅限于颗粒二维的观测, 使用的设备和仪器价格昂贵。

粒度薄片图像分析法是用自动或半自动图像分析法估算疏松砂岩和胶结砂岩的粒度分布, 是将砂岩颗粒分散在玻璃载片上, 使颗粒间不互相接触, 用与显微镜相连的视频照相机组成的简易图像分析设备, 得到每个颗粒的投影面积或直径。用背景 (较明亮的) 和颗粒 (较暗的) 的光度差作为界限标准, 把颗粒从背景中区分出来。一般需要 $200\sim 500$ 个颗粒, 耗时 $5\sim 15\text{min}$ 。该方法对非常小的样品也可以分析, 可快速获得原始数据, 以数字形式存储数据。但该方法对样品的代表性要求严格, 带有软件和视频照相的图像采集系统仪器的价格比目测法高。

激光衍射测定法是将分散的样品置于合适的携带液 (油或水) 中, 搅拌或循环携带液, 以保证颗粒分散。发射一个激光束通过分散的样品, 利用计算机分析衍射光谱图。该方法测量的粒度范围可达到超微粒度 (细粉砂和粘土级的粒度), 具有数据重复性好, 样品需要量少 (一般 $< 1.0\text{g}$), 测量迅速 (30s 到几分钟) 的特点。但该方法不适用于粗砂岩分析 (如果有粗砂岩粒度存在, 需要预先筛析), 使用的仪器和附带的硬件价格昂贵。

2. 粒度组成及表示方法

在求得某一粒级的颗粒直径及其质量后, 就可以分析砂岩的粒度组成。所谓粒度组成是指不同粒径范围 (粒级) 的颗粒占全部颗粒的质量百分数, 可用列表法和作图法表示其粒度组成。表 1-2 是划分粒级的一种常见方法。

表 1-2 粒级的划分

粒级划分	泥 (粘土)	粉砂		砂			砾			
		细粉砂	粗粉砂	细砂	中砂	粗砂	细砾	中砾	粗砾	巨砾
颗粒直径, mm	<0.01	0.05~ 0.01	0.1~ 0.05	0.25~ 0.1	0.5~ 0.25	1~ 0.5	10~ 1	100~ 10	1000~ 100	>1000

粒度组成也可以用作图法表示。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为表示不同的参数，采用不同的图式，例如，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），常见的粒度分布曲线的形态如图 1-4 所示。

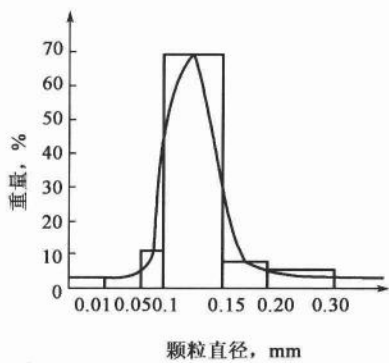


图 1-2 粒度组成分布曲线
(据卡佳霍夫, 1956)

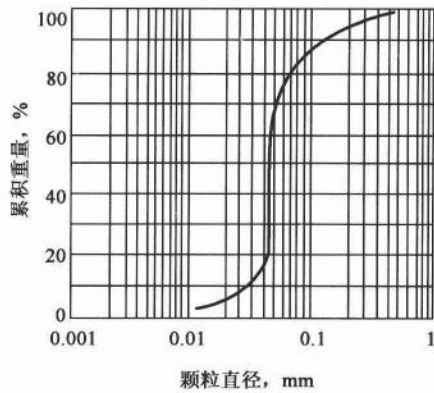


图 1-3 粒度组成累积分布曲线
(据卡佳霍夫, 1956)

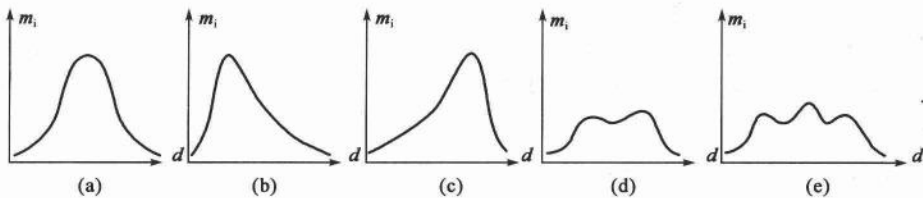


图 1-4 常见的粒度分布曲线的形态
(a) 对称型或钟形；(b) 正歪态；(c) 负歪态；(d) 双峰态；(e) 多峰态
 m_i —质量百分数 (%)； d —颗粒直径 (mm)

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为 1~0.01mm。

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，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求得不同粒度属性的粒度参数（表 1-3），从而可定量描述岩石粒度组成的均匀性。

此外，粒度分布数据也可用于：(1) 疏松岩层完井方案的工程应用；(2) 胶结和疏松砂岩层的非均质性评价和沉积环境解释的地质应用；(3) 评价不同相带地层测井曲线特征的油层物理应用。