

采油工实用读本

宋成立 郑本祥 主编



CAIYOU GONG
SHIYONG DUBEN

石油工业出版社

采油工实用读本

宋成立 郑本祥 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书集油田开发与开采工艺技术于一体，并侧重实际操作知识。内容包括储油岩石及其中流体的物性；油田开发基础；油藏开发动态分析；油井完成的工艺过程及试油；采油采气工程原理与技术；有杆泵采油的三抽设备；抽油井；注水；操作规程；制图的知识和技能；采油工艺管路安装等。

本书适合作为采油工自我提高的读物，也可供从事油田开发、采油工程的技术人员学习和参考，还适合做工人的培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

采油工实用读本/宋成立，郑本祥主编.
北京：石油工业出版社，2009.4
ISBN 978-7-5021-7036-3

- I. 采…
- II. ①宋…②郑…
- III. 石油开采 - 基本知识
- IV. TE35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 027993 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) 64523589 发行部：(010) 64523620

经 销：全国新华书店

印 刷：保定彩虹印刷有限公司

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本：1/16 印张：13

字数：328 千字 印数：1—2000 册

定价：45.00 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

《采油工实用读本》

编 委 会

主 编：宋成立 郑本祥

副主编：张 杰 孙国庆 周国英 王晓翠

审 定：王毓才 贤凤文

前 言

石油工业的生产是一个连续的过程，从石油勘探到石油开发、石油采出，石油集输、石油炼制，到生产出所需要的石油产品，每个过程都不是孤立的，尤其是石油开发与采出，更是分不开的两个阶段，常说“开采不分家”，本书就是基于这个思想编写的。目前，有关开发与采油方面的书已数不胜数，名目繁多，但把开发与采油融为一体的书却寥寥无几。本书就是取百家之优点，在综合理论和实践的基础上编写的关于开发与采油工艺技术的书籍。

本书以油田开发与开采的工艺技术原理为主线，内容包括储油岩石及其中流体的物性；油田开发基础；油藏开发动态分析；油井完成的工艺过程及试油；采油采气工程原理与技术；有杆泵采油的三抽设备；抽油井；注水；操作规程；制图的知识技能；采油工艺管路安装。

本书从加强基础理论、基本知识、基本技能等方面考虑，立足于从理论联系实际方面加深对油田开发与开采工艺技术的认识。并弥补了一般石油工人培训书的不足，增加了机械制图及管路安装的知识，便于工人在自我提高学习中使用，而且侧重于实际。

本书的目的是使学习人员全面了解和掌握油、气层物理性质及地下流体在油层中的分布规律，了解油气田开发与开采的全过程，并对采油工应掌握的技能知识有更深入的认识和理解。

本书在编写过程中考虑到矿场工人的自学需要，语言力求通俗易懂，内容全面，结论明确。所以它不仅可作为采油工人的自学读本，同时也可作为矿场工程技术人员的参考书。本书的内容源于实践，服务于实践，是一本普及性较高的读物。

本书由宋成立、郑本祥编写大纲，由宋成立、郑本祥、张杰、孙国庆、周国英和王晓翠分章编写。全书由王毓才、贤凤文审定。

本书如有错误和不当之处，请广大读者批评指正。

编 者

2008年12月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 储油岩石及其中流体的物性	(3)
第一节 储油岩石的物性	(3)
第二节 地层油、气、水的物性	(6)
第三章 油田开发基础	(14)
第一节 基本知识	(14)
第二节 油田储量和单井储量计算	(15)
第三节 油藏的驱动类型	(18)
第四节 注水开发矛盾	(20)
第五节 油田开发方案的编制	(23)
第六节 油田开发层系的划分	(27)
第七节 油田开发主要指标	(30)
第四章 油藏开发动态分析	(33)
第一节 动态分析常用的基础资料	(34)
第二节 油水井动态分析基本常识	(37)
第三节 开发动态分析的方法及实例	(41)
第五章 油井完成的工艺过程及试油	(59)
第一节 钻井	(59)
第二节 固井	(60)
第三节 完井方法	(60)
第四节 油井井身剖面	(64)
第五节 试油	(65)
第六章 采油采气工程原理与技术	(71)
第一节 自喷与气举采油	(71)
第二节 机械采油	(73)
第三节 稠油开采技术	(78)
第四节 高新采油技术	(82)
第五节 分层采油原理与采油常用设备	(89)
第六节 天然气开采工艺	(92)
第七章 有杆泵采油的三抽设备	(98)
第一节 抽油机	(98)
第二节 抽油泵	(100)
第三节 抽油杆柱	(102)
第八章 抽油井	(104)
第一节 任务与要求	(104)

第二节	确定合理工作制度	(105)
第三节	常见故障的判断与处理	(108)
第九章	注水	(113)
第一节	注水方式	(113)
第二节	水源选择及水质处理	(116)
第三节	注水流程	(118)
第四节	注入水的计量	(120)
第五节	注水井	(123)
第六节	分层注水	(128)
第七节	注水井吸水能力降低原因及处理方法	(131)
第八节	注水井常见故障的判断及处理方法	(135)
第十章	操作规程	(138)
第一节	抽油机井	(138)
第二节	注水井	(153)
第三节	采油计量间	(156)
第十一章	制图的知识和技能	(161)
第一节	制图的有关规定	(161)
第二节	手工绘图工具和仪器	(166)
第三节	零件图	(168)
第十二章	采油工艺管路安装	(176)
第一节	管路安装图基础知识	(176)
第二节	阀门及其连接件的单、双线图	(179)
第三节	组合管线单线图	(184)
第四节	管路轴侧图	(189)
第五节	组合管线轴侧图	(194)
第六节	管路组装	(196)
参考文献	(199)

第一章 绪 论

我国是世界上最早发现、开采和利用石油及天然气的国家之一，根据史料记载，已有3000多年的历史。由于天然气比石油更易从地层中逸出，遇到野火、雷鸣就会燃烧；因此，在历史上认识天然气早于石油。

早在3000年前，周代《易经》上就有了“上火下泽”、“火在水上”、“泽中有火”等记载，阐明了可燃天然气在地表湖泊水面所出露的气苗。

最早的石油记载见于1900多年前班固著《汉书·地理志》：“高奴，有洧（wèi）水，可燃”。高奴，系指今陕西省延安县一带，洧水是延河的一条支流。这是描述水面上的像油一样的东西，可以燃烧。可见早在近两千年前我国就发现了能够燃烧的陕北石油。

科学术语“石油”是北宋著名科学家沈括在《梦溪笔谈》中首次提出来的：“富”（县）延境内有石油，旧说高奴县出脂水，即此也”，“石油，生于水际沙石，与泉水相杂，惘（wǎng）惘而出”。他在描述了陕北富县、延安一带石油的性质和产状后，进一步推论了石油的利用远景：“此物后必大行于世，盖石油至多，生于地中无穹，不若松木有时而竭”，他还第一次用油烟做墨，即现代的所谓炭黑。

在历史上，石油不仅用于润滑、照明、燃烧和医药，而且很早就用于军事上。《元和郡县志》记载公元576年，酒泉人民用油烧毁突厥族攻城的武器，保全了酒泉城。北宋神宗6年（公元1073年）在京都汴梁军器监设有专门的“猛火油作”，加工制作兵器。

我国四川劳动人民最早利用天然气煮盐在世界上都是闻名的。晋朝常璩（qú）在《华阳国志》中记载了2200年前的秦始皇时代，四川临邛（qióng）县郡（即今邛崃县）西南劳动人民钻井开采天然气煮盐的情景：“有火井，夜时，光映上照。发欲其火，先以家火投之，顷许如雷声，火焰出，通耀数十里，以竹筒盛其光藏之，可拽（zhuài）行终不灭也。井有二水，取井火煮之，一斛水得五斗盐。有时一口火井可烧盐锅七百口。”

我国在世界上是最早开发气田的国家，四川自流气田的开采约有2000年历史。

可是，新中国成立前，我国只有两个地质调查队、几十个地质勘探队员，90%以上面积没有进行石油地质调查。石油产量少得可怜，从1904—1949年，石油累计产量不超过 $310 \times 10^4 \text{t}$ 。

新中国成立后，发现了许多油气田，石油产量成倍上升。中国的石油勘探历史大致经历了3个阶段：新中国成立后前10年为一阶段，开展全国石油普查，老一代地质学家李四光、黄汲清、潘钟祥等陆续做过一些重要的石油地质调查研究工作。地表油气显示较多，已有少数油气田。1959年9月松辽盆地松基3井喷油使我国石油勘探工作进入了第二阶段，将石油勘探的重点从西部转向东部大平原。在20世纪60年代初期，我国处在极端困难的情况下，开展了“松辽找油大会战”，拿下了大庆油田。此后接连发现山东的胜利油田（1963）、天津的大港油田（1964）等，石油产量迅速增长。1975年任丘古潜山油田的发现，打开了石油勘探的新领域，首次在古老的中、新元古界白云岩中找到了巨大的地层油藏，标志着我国石油勘探工作进入了第三个阶段。不仅在中、新生界陆相地层，而且在古生界和中、新元古界海相地层中寻找油气藏；不仅找背斜、断层等构造油气藏，而且注意勘探古潜山、地层超覆、古三角洲、古河道等多种类型地层油气藏；甚至将勘探区域更加扩大到边远的塔里木盆地和东南沿海大陆架。

中国石油的发展史可概括如下。

1949年，中国年产原油 $12 \times 10^4 \text{t}$ ，其中有 $5 \times 10^4 \text{t}$ 为人造原油。1952年底，全国原油产量达到 $43.5 \times 10^4 \text{t}$ ，为1949年的3.6倍，为新中国最高年产量的1.3倍。其中天然油 $19.54 \times 10^4 \text{t}$ ，占原油总产量的45%；人造油 $24 \times 10^4 \text{t}$ ，占55%。生产汽油、煤油、柴油和润滑油四大类油品 $25.9 \times 10^4 \text{t}$ ，比1949年提高6倍多。1955年10月，克拉玛依第一口井——克1井喷油。当时一些苏联地质专家对能否找到有开采价值的油田，曾有不同的看法。石油工业部在总结这一地区前段勘探经验教训的基础上，从1956年开始，调整勘探部署，集中力量在大盆地和地台上进行区域勘探，在康世恩同志主持下，把重点从准噶尔盆地南缘的山前拗陷转向西北缘，当年就拿下了一定面积，很快就探明了克拉玛依油田，实现了新中国成立后石油勘探上的第一个突破。克拉玛依油田的开发建设，有力地支援了建国初期的经济建设。1958年，青海石油勘探局在地质部发现冷湖构造带的基础上，在冷湖5号构造上打出了日产800t的高产油井，并相继探明了冷湖5号、冷湖4号、冷湖3号油田。在四川，发现了东起重庆，西至自贡，南达叙水的天然气区。1958年石油部组织川中会战，发现南充、桂花等7个油田，结束了西南地区不产石油的历史。到20世纪50年代末，全国已初步形成玉门、新疆、青海、四川4个石油天然气基地。1959年，全国原油产量达到 $373.3 \times 10^4 \text{t}$ 。其中4个基地共产原油 $276.3 \times 10^4 \text{t}$ ，占全国原油总产量的73.9%，四川天然气产量从1957年的 $6000 \times 10^4 \text{m}^3$ 以上提高到 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。在人造油方面，经过扩建和改造，东北各人造油厂的产量有了大幅度的增长。同时，还在广东茂名兴建了一座大型页岩油厂。1959年人造油产量达到 $97 \times 10^4 \text{t}$ ，当时在世界上处于领先地位。

从1955年起，地质部和石油部分工配合，先后在华北平原与松辽盆地展开了全面综合地质调查。1960年3月，一场关系石油工业命运的大规模的石油会战，在大庆揭开了序幕。1963年，全国原油产量达到 $648 \times 10^4 \text{t}$ 。在大庆石油会战取得决定性胜利以后，为继续加强我国东部地区的勘探，石油勘探队伍开始进入渤海湾地区。1964年，在天津以南，山东东营以北的沿海地带，开展了华北石油会战。到1965年，在山东探明了胜利油田，拿下了 $83.8 \times 10^4 \text{t}$ 的原油年产量。在天津拿下了大港油田。到1978年，大港油田原油年产量达到 $315 \times 10^4 \text{t}$ 。昔日芦苇丛生、人烟稀少的盐碱海滩，已变成绵延百里的油区。胜利油田到20世纪70年代达到原油产量增长最快的高峰期，年产量从1966年的 $130 \times 10^4 \text{t}$ 以上，提高到1978年的近 $2000 \times 10^4 \text{t}$ ，成为我国仅次于大庆的第二大油田。在渤海湾北缘的盘锦沼泽地区，石油队伍三上辽河油田。70年代以来，在复杂的地质条件下，勘探开发了兴隆台油田、曙光油田、欢喜岭油田，探索出一套勘探开发复杂油气藏的工艺技术和方法，1978年原油产量达到 $355 \times 10^4 \text{t}$ 。1970年4月，大庆开始了油田开发调整工作。到1973年，地下形势恶化的情况得到扭转，全油田原油产量比1970年增长了50%以上。1976年，大庆油田年产量突破 $5000 \times 10^4 \text{t}$ ，为全国原油年产量上 $1 \times 10^8 \text{t}$ 打下了基础。

自20世纪70年代以来，我国石油工业生产发展迅速，到1978年突破了 $1 \times 10^8 \text{t}$ 。全国原油产量从1982年起逐年增长，到1985年达到 $1.25 \times 10^8 \text{t}$ ，为世界第6位。为了多元发展我国的石油工业，我国于1982年成立了中国海洋石油总公司，于1983年7月成立中国石油化工总公司。中国第3家国有石油公司——中国新星石油有限责任公司也于1997年1月成立。至此，我国石油石化工业形成了4家公司团结协作、共同发展的新格局。1998年7月1日，中国石油天然气总公司与中国石油化工总公司重组，成立中国石油天然气集团公司与中国石油化工集团公司。

第二章 储油岩石及其中流体的物性

第一节 储油岩石的物性

每一个刚接触石油的人都会问这样一个问题：油田采出的原油来自地下什么地方？在地下是什么样子呢？这就是通常石油人所说的油藏。形象地说：每个油藏都是位于地下深浅不一、形状和大小也不一样的封闭空间；里面的原油也不是外行人所说的像个大水泡子，而是如同浸在豆腐里的水一样浸在岩石（如砂岩）里的。我们把能够储集石油，并允许石油在其内流动的岩层称为储油层。为了合理、高速、高水平地开发油田，必须了解储油层为什么能够储集石油，以及如何估计储油层中石油储量的大小。在油田钻井后石油为什么能够从地层中流到井中以及它们的流动状况如何，这些问题将通过对储油层岩石的基本特性的研究来解决。

储油层具有两个重要特性——孔隙性和渗透性。孔隙性保证了油气在地下有储集的空间，其孔隙的多少和大小直接影响到储集的数量。渗透性保证油气在岩层内可以流动，它的发育情况决定了油气在岩石中流动的难易程度。因此，孔隙性和渗透性是评价储层的重要标志。

一、储油层岩石的孔隙性

在油田钻井过程中，由地层中取出岩心，其中有些岩心中存在着许多肉眼难以看到的小孔。我们称这些小孔为岩石的孔隙，石油就储集在这些孔隙中。岩石所具有的这种特性，叫“孔隙性”。通过对岩心的研究，可以发现岩石中孔隙的大小是不同的，即有的孔隙大，有的孔隙非常微小；而有些孔隙是互相连通的，有些孔隙是不连通的。在相互连通的大孔隙中（孔隙半径大于 $0.1\mu\text{m}$ ），油气能够在其中储存，并可在其中流动，这种孔隙称为有效孔隙。有些孔隙不连通，或虽然连通但孔隙半径小于 $0.1\mu\text{m}$ ，虽然能储集油气，但不允许油、气在其中流动，因此称其为无效孔隙。按孔隙的成因可分为原生孔隙（岩石在沉积成岩过程中形成的孔隙）和次生孔隙（岩石形成后，受外力等作用形成的孔隙）。

1. 孔隙度

为了计算储油层中的石油储量，首先要知道油层的孔隙体积的大小，在油田生产实际中常用孔隙度这个概念来表示岩石孔隙的大小。所谓孔隙度是指岩石的孔隙体积与岩石的总体积之比。孔隙度又分为绝对孔隙度和有效孔隙度。

(1) 绝对孔隙度：岩石的总孔隙体积（包括有效孔隙和无效孔隙）与岩石的体积之比。

$$\phi_{\text{绝对}} = (V_{\text{总孔}}/V_{\text{岩石}}) \times 100\%$$

式中 $\phi_{\text{绝对}}$ ——岩石的绝对孔隙度；

$V_{\text{总孔}}$ ——岩石的总孔隙体积；

$V_{\text{岩石}}$ ——岩石的体积。

(2) 有效孔隙度：岩石的有效孔隙体积与岩石的体积之比。

$$\phi_{\text{有效}} = (V_{\text{有效}}/V_{\text{岩石}}) \times 100\%$$

式中 $\phi_{\text{有效}}$ ——岩石的有效孔隙度；

$V_{\text{有效}}$ ——岩石的有效孔隙体积。

孔隙度是计算储量和评价油层特性的一个重要指标，通常用的是有效孔隙度。一般砂岩孔隙度变化范围在 5% ~ 30% 之间，多为 10% ~ 25%；碳酸盐岩孔隙度较小，通常小于 5%，但在某些碎屑灰岩和生物灰岩中也可高达 20% 以上。

储油岩石的有效孔隙度可分为差（5% ~ 10%）、中（10% ~ 20%）、好（20% ~ 25%）和很好（25% ~ 30%）4 个等级。

2. 影响孔隙度大小的因素

为什么岩石孔隙大小不等，有的连通，有的不连通呢？它主要受以下几种因素的影响。

(1) 砂岩粒度：砂岩粒度分布状况对孔隙度有一定的影响，如果砂岩粒度均匀，孔隙度就比较大；如果砂岩粒度不均匀，则可能出现大颗粒之间填充有小颗粒的现象，使孔隙度变小。另外，如果颗粒直径大，孔道也就大，便于液体通过，孔隙度也就大。

(2) 胶结物：砂岩主要胶结物是泥质和灰质，灰质中主要是石灰岩和白云岩。通常用胶结物在岩石中的含量来表示岩石的胶结程度。对泥质胶结和灰质胶结来说，灰质胶结比泥质胶结牢固，胶结物含量高，岩石比较坚硬，但孔隙度较小。而泥质胶结，岩石比较疏松，孔隙度比较大。胜利油田沙一段和孤岛油田的油层胶结物主要为泥质，其含量在 1.25% ~ 6.5% 之间，胶结物如此之少，因此生产过程中易于出砂。

(3) 胶结类型：胶结物在砂岩中的分布状况，以及与碎屑颗粒的接触关系，称为胶结类型。胶结类型与岩石孔隙度的大小也有着密切的关系。

① 基底胶结：胶结物含量很高，砂岩颗粒是埋在胶结物中，彼此不相接触或接触很少。它的孔隙度很低。

② 孔隙胶结：胶结物含量不多，充填于颗粒之间的孔隙中，颗粒呈支架状接触。这种类型的孔隙度大于基底胶结。

③ 接触胶结：胶结物含量很少，分布于颗粒相互接触的地方，颗粒呈点状或线状接触。它的孔隙度最高。

二、储油岩石的渗透性

地层原油，在一定的压差下，从岩石孔隙中流向井底。岩石让流体（油、气、水）通过的性质称为岩石的渗透性。而渗透率则表明了该岩石允许流体通过的能力。岩石的渗透率可以通过实验室测定岩样求得，其大小是用达西经验公式确定的。

1. 达西定律

达西定律是指流体在多孔介质中渗流时，其流量与介质的横截面积、介质两端的压力差成正比，而与流体的黏度、介质的长度成反比。公式为：

$$Q = KA (p_1 - p_2) / (\mu \cdot L)$$

上式可改写成：

$$K = Q \cdot \mu \cdot L / [A (p_1 - p_2)]$$

式中 K ——比例系数，即渗透率，它表示多孔介质渗透能力的大小；

A ——岩样的横截面积， m^2 ；

L ——岩样的长度， m ；

μ ——通过流体的黏度， $Pa \cdot s$ ；

$p_1 - p_2$ ——流体通过介质前后的压差， MPa ；

Q ——在 $p_1 - p_2$ 下通过岩样的流体的流量， m^3/s 。

2. 渗透率的单位

渗透率的基本单位是平方米，符号为 m^2 。由于该单位太大，在石油工程中采用平方微米，用符号 μm^2 表示。它与达西和毫达西的关系为：

$$1 \mu m^2 = 1.01325 D = 1013.25 mD$$

在实际应用中，可采用： $1 \mu m^2 = 1 D = 1000 mD$ 。

当液体的黏度为 $1 mPa \cdot s$ ，压差为 1 大气压，岩石截面积为 $1 cm^2$ ，岩石长度为 $1 cm$ ，此时所通过的液体的体积流量正好为 $1 cm^3/s$ 时，该岩石的渗透率大小为 1D。

储层的孔隙度与渗透率之间通常有较密切的关系，一般有效孔隙度增高，渗透率增大。

渗透率是岩石本身的物理性质，对于一块具体的岩样来说，它是一个不变的常数。这个常数只与组成岩石的颗粒成分、粒度、分选及胶结类型有关，而和所通过的流体性质无关。

3. 有关渗透率的概念

(1) 绝对渗透率：当岩石中只有一种流体通过，而这种流体又不会造成岩石孔隙结构上的变化时测出的岩石渗透率称为绝对渗透率。通常用干燥空气来测定岩石的绝对渗透率，因此绝对渗透率也就是空气渗透率。通常在现场上所用的渗透率指绝对渗透率。

(2) 有效渗透率：当岩石中有两种或多种流体同时存在时，岩石对其中某一种流体的渗透率就叫作岩石对这种流体的有效渗透率或相渗透率。

例如当储层中油、水共存时，我们就会测出油的有效渗透率和水的有效渗透率。有效渗透率的大小，在一定地质条件下与流体本身饱和度有关。饱和度越大，有效渗透率也就越大。岩石的有效渗透率都小于绝对渗透率。岩石中各流体的有效渗透率之和也小于绝对渗透率。

(3) 相对渗透率：有效渗透率与绝对渗透率之比叫相对渗透率，用百分数表示。

$$\text{相对渗透率} = \text{有效渗透率} / \text{绝对渗透率} \times 100\%$$

油、气、水各相的相对渗透率分别用 $K_o/K \times 100\%$ ， $K_g/K \times 100\%$ ， $K_w/K \times 100\%$ 来表示。

下面举例来说明绝对渗透率、有效渗透率和相对渗透率的概念。

[例] 设有一岩样长为 $3 cm$ ，截面积为 $2 cm^2$ ，用 100% 饱和的黏度为 $1 mPa \cdot s$ 的盐水，在压差为 $2.026 \times 10^5 Pa$ (2 个大气压) 下的流量为 $0.5 \times 10^{-6} m^3/s$ ($0.5 cm^3/s$)。求该岩石的绝对渗透率。

解：绝对渗透率 $K = Q \cdot \mu \cdot L / [A (p_1 - p_2)] = 0.5 \times 1 \times 3 / (2 \times 2) = 0.375 D$

若上述岩石中饱和 70% 的盐水和 30% 的油，压差为 $0.2 MPa$ ，则盐水的流量为 $0.3 cm^3/s$ ，油的流量为 $0.02 cm^3/s$ ，黏度为 $3 mPa \cdot s$ ，则岩样对盐水的有效渗透率 K_w 为：

$$K_w = Q_w \cdot \mu_w \cdot L / [A (p_1 - p_2)] = 0.3 \times 1 \times 3 / (2 \times 2) = 0.225 D$$

对油的有效渗透率则为： $K_o = Q_o \cdot \mu_o \cdot L / [A (p_1 - p_2)] = 0.02 \times 3 \times 3 / (2 \times 2) = 0.045 D$

有效渗透率之和为 $K_o + K_w = 0.225 + 0.045 = 0.27D$

从以上实例说明，同一岩石的有效渗透率之和，总小于它的绝对渗透率。这是由于岩石与油水发生的物理、化学作用和油、水间的相互作用造成的。

根据油、水的有效渗透率数值，来计算一下该岩石对它们的相对渗透率。

对水的相对渗透率： $K_{rw} = K_w / K \times 100\% = 0.225 / 0.375 \times 100\% = 60\%$

对油的相对渗透率： $K_{ro} = K_o / K \times 100\% = 0.045 / 0.375 \times 100\% = 12\%$

相对渗透率之和为： $K_{rw} + K_{ro} = 12\% + 60\% = 72\%$

同一岩石的相对渗透率之和总小于1。

油层岩石的渗透率大小对储油岩层的物理性质影响极大。渗透能力越强，油在油层中越容易流动，在一定压差下流向井筒的油量就越多，反之则少。因此它是衡量或者说是反映油层产油能力的一个重要参数。

三、储油（气）岩层的含油（气）性

储油（气）岩层的含油（气）性是指地下储层中含有一定数量的油（气）。如果油层孔隙中石油含量多，则油层的含油性好。表示含油性好坏的指标用含油饱和度表示。

1. 含油饱和度

含油饱和度是指在储油岩石的有效孔隙体积内，原油所占的体积分数。

含油饱和度 $S_o =$ 岩石孔隙中的含油体积 / 岩石的有效孔隙体积 $\times 100\%$

同样也可计算出油层中水和气的饱和度：

$S_g =$ 岩石孔隙中的含气体积 / 岩石的有效孔隙体积 $\times 100\%$

$S_w =$ 岩石孔隙中的含水体积 / 岩石的有效孔隙体积 $\times 100\%$

如果油层中只有油水两相，从理论上讲： $S_o + S_w = 1$ 。

如果一个油层中，油、气、水三相同同时存在，则： $S_o + S_w + S_g = 1$ 。

2. 原始含油饱和度

一般将油层尚未开发时测得的含油饱和度称为原始含油饱和度，它是计算油田可采储量的重要参数。随着油田的开发，石油不断从油层中采出，流体的饱和度也在不断变化，含油饱和度越来越低，含水饱和度越来越高。在油田开发过程中的某个阶段取得的含油、含水饱和度叫目前含油、含水饱和度，它是了解油田开发现状的一项重要参数。

四、岩石的润湿性

液体对固体和对液体本身的相对吸引力不同，所以液体在固体表面可能铺展，也可能不铺展。液体在岩石表面的铺展能力称润湿性。影响润湿性的主要因素有岩石矿物组成、原油及水的性质和岩石表面的粗糙度。

第二节 地层油、气、水的物性

一、石油

石油是一种以液体形式存在于地下岩石孔隙中的可燃性有机矿产之一。从直观上看，它表现为比水稠但比水轻的油脂状液体，多呈褐黑色；化学上是以碳氢化合物为主体的复杂混

合物。液态石油中通常溶有相当数量的气态烃和固态烃，还有极少量的悬浮物。因此，石油有确定的化学成分和物理常数。

1. 石油的物理性质

1) 地面条件下石油的物理性质

(1) 颜色：石油的颜色变化范围很广，从暗色到浅色都有。在透射光下，石油的颜色从无色透明逐渐过渡到淡黄、褐黄、淡红、棕色、黑褐色及黑色，或者介于两种颜色之间的过渡颜色。例如：四川油田川东石油为墨绿色，川中石油为黄色、深色甚至黑色；新疆克拉玛依油田的石油为褐黑色；而华北油田凝析油则为无色透明。石油颜色的浓度，往往取决于石油中胶质、沥青质的含量。胶质、沥青质含量愈高则颜色愈暗。一般轻质油的颜色微带黄橙色且又透明；重质油多近于黑色。

(2) 气味：石油通常都有明显的气味。较轻质的石油带有芳香味；而浓黑的石油多带柏油味；含硫(S)、氮(N)、化合物的石油有一股臭鸡蛋味。

(3) 相对密度：液体石油的相对密度是指在0.101MPa的压力条件下，20℃的石油质量与同体积的4℃纯水质量之比，用 γ 表示。石油的相对密度一般介于0.75~0.98之间，个别地区也有小于0.75或大于1的。例如，美国加利福尼亚油田石油相对密度竟高达1.01；而前苏联苏拉罕油田的石油相对密度却为0.71。我国各油田的石油相对密度大多数为0.82~0.92。

一般把相对密度小于0.9的石油称为轻质油；而大于0.9的石油则称为重质油。相对密度小的油质好；相对密度大的油质差。石油相对密度大小取决于石油的化学组成，含烃类多的石油相对密度小，而含胶质、沥青质多的石油相对密度大，相对密度大于1的石油，用一般方法难以开采。

(4) 黏度：石油的黏度是指原油分子间发生相对位移时，所受到的阻力或内摩擦力。石油黏度的大小，取决于温度、压力和石油的化学成分。黏度随温度升高、溶解气量增加而降低；压力增高时则黏度加大；石油中轻质油组分增加，黏度随之降低；而蜡、胶质、沥青质含量高时，则黏度亦高。

石油黏度的大小，决定了石油流动性的难易，黏度大则流动性差，黏度小则流动性好。黏度这个参数，对了解油气运移、油井动态分析、石油开采及储运都有重要的参考价值。如果石油黏度过大，原油在地层中或井筒内流动就困难，因此必须采取有效措施，如热力采油、稠油降黏等方法采油。如果原油黏度能降低一半，在其他条件相同时，就能使原油流量增加一倍。

(5) 溶解性：石油的溶解性是指石油能溶解于多种有机溶剂，如氯仿、苯、石油醚、四氯化碳及酒精等的性质。可根据石油溶解性，简易鉴定岩石中有无微量的石油存在。石油在水中溶解度很低。

(6) 导电性：石油的导电性是指石油的导电能力。石油及其产品具有极高的电阻率，是不良的导电物质。石油的电阻率为 $10^9 \sim 10^{10} \Omega \cdot m$ ，与周围的矿化水和岩石相比较，可视为无穷大。地球物理测井就是利用流体的这种导电性确定油、气、水层的位置、深度，以便进行地层对比。

(7) 荧光性：石油在紫外线照射下，可产生荧光的性质称为石油的荧光性。石油的油质组分发浅蓝色明亮的荧光；胶质组分发淡黄色半明亮的荧光；沥青质组分发褐色暗淡的荧光。利用石油的荧光性，可以鉴定岩心、岩屑及钻井液中是否有微量石油存在。

(8) 含蜡量：石油中以溶解状态和悬浮状态存在的石蜡占石油质量的百分数称为石油

的含蜡量。含蜡量多时，石油相对密度也较大，并可使井底和井筒结蜡，给采油工作增加困难。

(9) 凝固点：由于温度下降，石油由液态开始凝固为固态时的温度，称为石油的凝固点。凝固点的高低与石油组分有关，主要取决于石油含蜡量的多少，含蜡量高的，凝固点也高。低凝固点的石油为优质石油。

(10) 旋光性：石油能够将偏振光的振动再旋转一定角度的能力，称为石油的旋光性。石油的旋光角一般在几分之一度到几度之间。不同的石油其旋光性亦有所不同，有左旋、右旋之分，绝大部分石油的旋光角向右旋转，仅有少数为左旋。因为只有有机化合物才具有旋光性，所以石油的旋光性是“石油有机生成说”的有力证据之一。

2) 地层条件下石油的物理性质

石油储集在地下储油岩层内，油层的压力和温度都比地面高得多，并且油层中的石油又总是溶解一定数量的天然气，因而地下石油与地面条件下石油的物理性质大不相同。在计算油田储量和合理开发时间时，必须掌握地层条件下的石油物理性质。

(1) 相对密度和黏度：在地层条件下，石油的相对密度与石油中溶解的天然气量、地层压力和温度有关。石油中溶解气量多者则相对密度小，溶解气量少者则相对密度大。在其他条件不变的情况下相对密度随温度升高、溶解气量增加而降低。在地下 1500 ~ 1700m 处，石油的黏度值通常仅为地表黏度值的 50% 左右。

(2) 原始气油比：在原始条件下，每 1t 石油中能溶解的天然气量称为原始气油比。原始气油比的大小取决于天然气和石油的成分、温度和压力条件。石油中溶解的天然气量多，能使石油的相对密度和黏度减小，体积增大。

(3) 饱和压力：在油层条件下，当地层压力高于一定数值之后，天然气就会完全溶解于石油中，地下的油、气就会处于单相——液相状态。当地下石油已为天然气所饱和，则多余的天然气就会聚集在油藏上部形成气顶，地下的油、气就处于两相——液相和气相状态。

当油田投入开发后，地层压力也就逐渐降低，但压力降到某一数值以后，原来溶解在石油中的天然气就不断地分离出来，故把从石油中分离第一个气泡时的压力，称为石油的饱和压力。对于有气顶的油藏来说，饱和压力等于原始地层压力；而单相状态的石油，未被气体所饱和，地层压力要降得很多，才能出现气相。饱和压力是油田开发的基本数据之一。

饱和压力的大小与石油及天然气的性质和数量有关。在石油中的天然气含量是决定饱和压力大小的一个重要因素，对地层温度也有一定的影响。如果原油性质、温度基本相同，气油比高者，饱和压力大；如原油轻质成分少，重质成分多，溶解的天然气量少，饱和压力就低。当温度增加时，饱和压力也随之增加。

(4) 体积系数：地层条件下石油的体积与其在标准状况下地面脱气后石油体积之比值，称为石油的体积系数。公式为：

$$B_{oi} = V_{\text{地下}} / V_{\text{地面}}$$

式中 B_{oi} ——体积系数；

$V_{\text{地下}}$ ——地层条件下石油的体积， m^3 ；

$V_{\text{地面}}$ ——与 $V_{\text{地下}}$ 同体积的石油采到地面脱气后的体积， m^3 。

影响体积系数的因素有压力、温度及石油中的溶解天然气量。其中溶解天然气量对石油体积变化起着主要作用，这在油层压力低于饱和压力时反映最明显。

由于油层一般都处于高温、高压之下，地层石油中溶有大量的天然气，溶解的天然气体量和油层温度对体积系数的影响，远远超过弹性压缩的影响，故地层条件下石油的体积比在地面脱气后的体积要大，一般石油体积系数均大于1。体积系数是计算石油储量、进行油田动态研究常用的基本参数之一。

2. 石油的组成

1) 石油的元素组成

石油没有确定的化学成分，因而也就没有确定的元素组成。石油尽管是多种多样，但它们的元素组成却局限在较窄的变化范围之内，碳（C）、氢（H）占绝对优势。根据对世界各地油田石油化学分析资料统计，石油中含碳量在80%~88%之间，含氢量在10%~14%之间，碳、氢含量的总和大于95%，石油的碳氢比（C/H）介于5.9~8.5之间。碳、氢两元素在石油中组成各种复杂的碳氢化合物，即烃类存在，它是石油组成的总体。

石油中除碳、氢外，还有氧、氮、硫等元素，一般它们总量不超过1%，个别油田可达5%~7%，这些元素在石油中多构成非烃有机化合物。它们含量虽少，但对石油质量有一定影响，如石油中含硫则具有腐蚀性，且降低石油的品质。

除上述元素外，在石油成分中还发现有30余种微量元素，但含量较少。其中以钒、镍为主，约占微量元素的50%~70%。因此，在石油残渣中提炼某些稀有元素，是一个值得注意的领域。

2) 石油的烃类组成

从有机化学角度来讲，凡是仅由碳、氢两个元素组成的化合物，称为碳氢化合物，简称“烃”。石油主要是由3种烃类组成，即烷族烃、环烷烃和芳香族烃。

3) 石油的组分组成

根据石油中不同的物质对某些介质有不同的吸附性和溶解性，将石油分为4种组分。

(1) 油质：油质是由烃类（几乎全部为碳氢化合物）组成的淡色油脂液体，荧光反应为浅蓝色，它能溶于石油醚中，但不能被硅胶吸附。油质是石油的主要组成部分，含油量约为65%~100%。油质含量高，颜色较浅，石油质量好，反之则质量差。

(2) 胶质：胶质呈浅黄褐色，半固态的黏糊状流体。密度为 $1 \sim 1.07 \text{g/cm}^3$ ，能溶于石油醚，也能被硅胶所吸附，荧光反应为淡黄色，多由环烷族烃和芳香族烃组成。在轻质石油中胶质含量一般不超过4%~5%，而在重质石油中胶质含量可达20%，石油呈褐色或黑褐色的原因之一，就是因为存在胶质。

(3) 沥青质：沥青质是暗褐色或黑色的脆性固体物质，沥青质的组成元素与胶质基本相同，只是碳氢化合物减少了，而氧、硫、氮的化合物增多了。密度大于 1g/cm^3 ，可溶于苯、二硫化碳、氯仿、三氯甲烷等有机溶剂中，却不溶于酒精、汽油石油醚，可被硅胶吸附，荧光反应为深黄褐色。在石油中沥青质含量很少，一般小于1%，个别情况可达3%~3.5%。

(4) 碳质：碳质是黑色固体物质，不具荧光，不溶于有机溶剂，也不被硅胶所吸附，是由更高分子碳类物质组成。石油中一般不含或极少含碳质。

石油组分是衡量石油品质的标志之一，质量好的石油含油质高。胶质和沥青质的存在增加了石油的结蜡性，并使石油产品的颜色加深，对石油的炼制是不利的。

二、天然气

天然气从广义上理解，是指以天然状态存在于自然界的一切气体。在石油地质学中所指

的天然气是指与石油有相似产状的、通常以烃类为主的气体，即指油田气、气田气、凝析气和煤成气等。

1. 天然气的物理性质

1) 相对密度

天然气的相对密度是指在标准状态下，即温度为 0°C ，压力为 0.101MPa ，单位体积天然气质量与同体积空气质量之比。天然气的相对密度一般在 $0.6\sim 1$ 之间，比空气轻。含重烃量多的天然气相对密度也大，如中原油田个别油气藏的天然气相对密度竟高达 1.0298 ，主要是天然气中含重烃较多所致。相对密度小的天然气其主要成分以甲烷为主，含量约在 90% 以上，例如四川油田阳三气藏，天然气相对密度为 0.562 ，其甲烷含量竟高达 98.15% ；相对密度大的天然气中甲烷含量相对较少。

天然气是各种气体的混合物，其中各种气体的相对密度大小不同。天然气中各组分的相对密度可以根据它的组分含量计算出来。一般天然气液化后，体积缩小 1000 倍，故在天然气和石油产量、储量中，常采用 1000m^3 天然气相当于 1m^3 石油，其利用价值也大致相当。

2) 黏度

天然气的黏度是指天然气在流动时，分子间所产生的内摩擦力。黏度是以分子间相互碰撞的形式体现出来。在压力接近 0.101MPa 的情况下，温度增加，分子的活动性增强，碰撞的次数增多，黏度也增加。如在 0°C 时天然气的黏度为 $0.000131\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，而温度增至 20°C 时，其黏度为 $0.0120\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

3) 溶解度

任何气体均可不同程度地溶解于液体中。在一定压力下，单位体积的石油所溶解的天然气量，称为该气体在石油中的溶解度。当温度不变时，单组分的气体，在单位体积溶剂中的溶解度与绝对压力成正比。

各种不同成分的气体，在同一温度、压力及同一石油中的溶解度是不同的，一般相对分子质量较大的气体，溶解度也较大。天然气在石油中的溶解量随压力增加而增大，而随温度增加而减少。当天然气溶于石油之中后，就会降低石油的相对密度、黏度及表面张力，使石油的流动性增大。天然气也可以溶于水中，但较溶于石油中的溶解能力小 10 倍。天然气在地下水中的溶解量，随着含盐量增多而减少。

4) 压缩系数

在相同温度、压力下， 1g 分子真实气体天然气的体积与理想气体的体积之比，称为天然气的压缩系数。因真实气体比理想气体更易被压缩，故压缩系数小于 1 。压缩系数是气田开采中计算气层压力必不可少的数据之一。

5) 体积系数

在标准状态下， 1m^3 天然气在地层条件下所占的体积，称为天然气的体积系数。在计算天然气储量和采出量时，要进行地面条件下和地层条件下体积的换算，就必须了解天然气的体积系数。

6) 临界温度、临界压力

每种气体都有一个特有的温度，在此温度以上，无论加多大压力，都不能使气体液化，这个温度称为临界温度。而与其相应的压力，称为临界压力。

天然气是由各种碳氢化合物和其他气体混合而成，不同碳氢化合物和气体，具有不同的临界温度和临界压力。