



SHIYOU

中等专业学校教学用书

油气集输

蔡春知等
编

石油工业出版社

油 气 集 输

蔡春知等 编

石油工业出版社

B
722373

内 容 提 要

本书系中等专业学校油气集输储运工程专业的专业课教材，主要论述如何为国家提供既符合质量、又满足数量要求的原油和天然气，使之达到管输要求。主要内容包括：油田开采概述；油气分离和原油稳定；原油脱水和含油污水处理，天然气净化和轻油回收；油气混输管路及油气集输工程设计等。

本书也可供从事油田集输系统工程设计和生产管理的工程技术人员参考。

油 气 集 输

蔡春知等 编

中国石油天然气总公司教材编译室编辑

(北京 902 信箱)

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

北京海淀昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 16 开本 18¹/₄ 印张 1 插页 445 千字印 1—4,000

1990年 8 月北京第 1 版 1990年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0372-4/TE·362 (课)

定价：3.30元

前 言

本教材是根据石油天然气总公司人事教育部（原石油工业部教育司）1986年制订的中等专业学校“油气集输教学大纲”编写的。本书可作为中等专业学校油气集输储运工程专业的教材，也可供有关方面工程技术人员参考。

在编写过程中，力求使教材能满足加强基础知识和结合生产实际的教学要求。内容包括油田开采概述、油气分离和原油稳定、原油脱水、天然气净化与轻油回收、含油污水处理、油气混输管路和油气集输工程设计等。油气集输中原油和天然气集输管路的水力和热力计算等内容，因与《油气储运工艺》所论述的内容相同，为避免重复，本教材不再赘述。对油气集输储运工程中常用设备的使用操作、维护保养、常见故障及其排除方法等内容，将另编成册，作为学生生产实习时的参考用书。

本书由胜利石油学校油气集输储运工程教研室组织编写，第五章由胜利油田设计规划研究院何桂华同志编写；第二章由崔玉华同志编写；第三、四章由杨俊玉编写；第一、六、七章由蔡春知编写，教研室的陈桂祥、王克华、张国栋、吴占鳌和王素华等同志参加了部分工作。全书由蔡春知统稿，石油大学储运教研室鲍冲教授主审。

目 录

绪论	(1)
第一章 油田开采概述	(5)
第一节 石油及油气藏	(5)
第二节 石油在地层中的渗流	(11)
第三节 石油的开采	(18)
第四节 油井的剩余能量及其利用	(27)
第二章 油气分离和原油稳定	(30)
第一节 基本概念	(30)
第二节 原油和天然气的相平衡	(34)
第三节 原油和天然气的分离	(49)
第四节 原油稳定	(95)
第三章 原油脱水	(116)
第一节 概述	(116)
第二节 表面现象	(118)
第三节 表面活性剂	(123)
第四节 乳状液	(128)
第五节 热沉降脱水	(136)
第六节 化学脱水	(141)
第七节 电脱水	(146)
第八节 原油脱水工艺流程	(158)
第四章 天然气净化与轻油回收	(163)
第一节 天然气中水化物的生成与防止	(164)
第二节 天然气的固体吸附法脱水和轻油回收	(168)
第三节 天然气的溶剂吸收法脱水和轻油回收	(174)
第四节 天然气的低温分离法脱水和轻油回收	(179)
第五节 天然气脱硫和脱二氧化碳	(184)
第五章 含油污水处理	(188)
第一节 污水和注入水的水质	(188)
第二节 含油污水处理	(191)
第三节 含油污水水质稳定处理	(207)
第四节 含油污水处理站的典型流程	(210)
第六章 油气混输管路	(213)
第一节 两相流的流动型态	(213)
第二节 油气混输管路的压降计算	(215)
第三节 管路条件下油、气两相有关参数的确定	(239)
第七章 油气集输工程	(247)

第一节 油气集输工程设计.....	(247)
第二节 油气集输工程的基本内容.....	(250)
第三节 油气集输工艺流程.....	(259)
附录.....	(271)
1. 烃类平衡常数.....	(271)
2. 含有甲烷、乙烷系统的液相表观粘度.....	(284)
3. 烃类平衡常数图.....	(285)

绪 论

一、油气集输储运工程概述

将油田各油井从地下开采出来的原油和伴生气(天然气),经地面上的一系列设备,进行收集、初步加工处理、储存及输送的工艺过程,称为油气集输储运工程。油气集输储运所承担的工作,如示意图所示,主要包括三个方面:

1. 油井采出的气液混合物,经过集输管路、计量站(有时也经分输接转站)进入原油处理站进行气、液分离,分离出的原油进行脱水和稳定处理;分离出的天然气输送到气体处理站进行脱水和轻油回收,使经过处理的原油和天然气达到管输要求;

2. 处理站将处理合格的原油和天然气分别输送到矿场原油库(或长输管道首站)和压气站(或输气首站);

3. 从矿场原油库将原油以不同的输送方式,输送到炼厂或国民经济其它各部门;天然气经管路输往化工厂和其它各部门。

因此,油气集输储运的主要任务是:根据油田自然条件、原油物性以及油田开发与开采的特点,采用最先进的工艺措施,把采油工作者从地下开采出来的油和气,最大限度地收集起来;经过初步加工和处理,为国家提供既符合质量标准、又满足数量要求的原油和天然气;将规定的油和气,安全、经济地输送到指定地点;同时做到既能满足油田长期高产和稳产的要求,又能把原油生产和输送过程中的损耗和所需的能耗降到最低限度,以收到“少投入,多产出”的经济效果。

油气集输储运系统,在油田内部并不进行任何生产,但它是油田地面建设中的重要组成部分,是油田地面骨架工程之一,是油田开发、开采和原油加工之间的纽带,是沟通石油工业与国民经济其它各部门的桥梁。它将调节原油和天然气的生产、运输和消费三者之间的关系,保证对国民经济各部门稳定供应,促进社会主义现代化建设的顺利进行。

自大庆油田、继而在我国东部华北等地一批油田的发现与开发,近30年的生产实践证明,在我国基本上形成了一整套与油田开发、开采相适应的油气集输储运工艺技术。每天大约有几十万吨原油,分别从不同油田、不同油层的油井开采出来,通过地面上纵横交错的成千上万公里的油气集输管线,经计量站汇集到原油处理站,经脱气、脱水和稳定处理后,原油进入矿场原油库(或长输管线首站),经管道(或铁路油罐车)外输(或外运)到国民经济各部门;脱出来的气作为化工原料或燃料输往有关工厂和用户;脱出来的污水经过处理回注油层。

80年代以来,随着我国石油工业的发展,油气产量的增加,各油田在确保稳产的基础上,在降低油气损耗、降低生产能耗、充分利用油气资源等方面,使油气集输工艺技术又提高到了一个新的水平。全面推广了化学降粘集输,并积极开展了各种不加热集输试验的研究,油气集输流程逐步由简单到完善,由开式向密闭转化;原油采用负压闪蒸及加热蒸馏稳定处理,油田气采用浅冷深冷初加工处理,回收轻烃为乙烯化工厂提供原料,这标志着我国已由过去的单一生产向综合利用油气资源的方向发展,油气集输工艺技术进入了一个新的阶

段。

在油气输送方面，十几年来，我国已建成长输管道 50 多条，总长大约 14 000km，分布于全国 19 个省、市、自治区，已初步形成东北、华北、华东、中原等地区和四川省的油气输送管网；认真执行“以产定运，以销保产”的输油方针，采取强化输油质量管理，改进输油工艺技术措施，千方百计降低电耗、燃料油耗和减少输油过程中的自然损耗，做到安全、低耗、高效输油。泵到泵密闭输油工艺技术及燃气轮机组已试验成功；对原油进行热处理，添加减阻剂和降粘降凝剂，突破了原油加热输送的单一传统方式；管道清管器研制成功，使管道处于最佳运行状态，这些都标志着我国原油和天然气的输送技术也达到或接近了国际先进水平。

二、本课程内容及学习方法

由于油气集输储运工程是一门比较复杂的多基础的实用科学，为了便于学习和讲授，本学科内容由四部分组成，并独立编成册：

油气集输

主要论述如何为国家提供既符合质量标准、又满足数量要求的原油和天然气，并达到管输要求。内容有油田开采概述；油气分离和原油稳定处理；原油脱水；天然气净化与轻油回收；含油污水处理；油气混输管路和油气集输工程设计。

油气储运工艺

油气储运工艺由上、下两篇组成。上篇为《原油的输送》，内容包括：原油组成及流动特性；低粘、低凝原油和轻质成品油的管路输送；高粘、易凝原油的管路输送；原油装车外运；站、库总体布置；原油计量；油品蒸发损耗和站、库安全生产技术等。下篇为《天然气的管路输送》，将简要介绍天然气物理和物理-化学性质；输气管路的水力和热力计算；输气站；输气管路—压缩机站的联合工作等。

油气储运设备

主要内容包括：离心泵；压缩机；输油管强度及防腐；储油设备和加热设备等。

油气集输储运仪表及自动化

系统介绍油气集输储运工程中油气计量常用测量仪表（压力、温度、流量和液位）的结构原理、安装使用和调校方法等基本知识，以及常用的调节系统的基本调节作用，调节过程的参数整定等。

本课程特点是以生产体系组织教学内容，是工程性、实用性、综合性应用课，实践性强。因此，要正确处理好讲课、结构课、实验、作业、辅导、课程设计、毕业设计、生产实习和毕业实习等各个教学环节间的相互关系。讲课是各个教学环节的中心，在学习本课程时必须抓住这个中心环节，学好基本理论。同时，要善于利用其它教学环节特点来加深、巩固和扩大课堂所讲授的基本内容，尤其生产实习是学好本课程的必备条件。只有这样，才能使学生具备站、库生产管理的基本技能和专业知识，做到懂工艺设计，懂设备构造和性能，懂工艺流程；会操作，会收集和分析资料，会保养和维修，会事故判断和处理，并将所学的各种知识密切联系实际，灵活地运用到生产中去，更好地为四化建设服务。

三、单位制

全书将全部采用中华人民共和国法定计量单位，其中包括：国际单位制的基本单位、辅

助单位和导出单位；国家选定的非国际单位制单位以及由以上单位构成的组合形式的单位。但考虑到油田目前许多以工程单位制标定的设备还在使用，而且工程技术人员及工人还在继续使用石油工业习惯的技术术语和单位，为了便于过渡，将书中经常遇到的一些常用法定单位与工程单位制的换算关系列表如下，以便对照。

常用非法定计量单位与法定计量单位的换算关系

量的名称	非法定计量单位		法定计量单位			换算关系
	名称	符号	名称	符号	其它表示式例	
力	千克力	kgf	牛顿	N	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$	$1 \text{kgf} = 9.80665 \text{N}$
力矩	千克力米	kgf·m	牛顿米	N·m		$1 \text{kgf} \cdot \text{m} = 9.80665 \text{N} \cdot \text{m}$
压强	千克力每平方米	kgf/m ²	帕斯卡	Pa	N/m ²	$1 \text{kgf}/\text{m}^2 = 9.80665 \text{Pa}$
	工程大气压	at				$1 \text{at} = 9.80665 \times 10^4 \text{Pa}$
	标准大气压	atm				$1 \text{atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$
	巴	bar				$1 \text{bar} = 10^5 \text{Pa}$
	毫米水柱	mmH ₂ O				$1 \text{mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{Pa}$
	毫米汞柱	mmHg				$1 \text{mmHg} = 133.322 \text{Pa}$
应力、强度	千克力每平方厘米	kgf/cm ²	帕斯卡	Pa	N/m ²	$1 \text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.80665 \times 10^4 \text{Pa}$
动力粘度	泊	P	帕斯卡秒	Pa·s	N·s/m ²	$1 \text{P} = 0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}$
	千克力秒每平方米	kgf·s/m ²				$1 \text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2 = 9.80665 \text{Pa} \cdot \text{s}$
能量、功	千克力米	kgf·m	焦耳	J	N·m	$1 \text{kgf} \cdot \text{m} = 9.80665 \text{J}$
	千瓦小时	kWh				$1 \text{kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{J}$
	卡	cal				$1 \text{cal} = 4.1868 \text{J}$
	千卡(大卡)	kcal				$1 \text{kcal} = 4186.8 \text{J}$
功率	千克力米每秒	kgf·m/s	瓦特	W	J/s	$1 \text{kgf} \cdot \text{m}/\text{s} = 9.80665 \text{W}$
	马力					$1 \text{马力} = 735.499 \text{W}$
导热率	千卡每小时开尔文	kcal/m·h·K	瓦特每米开尔文	W/m·K		$1 \text{kcal}/\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K} = 1.163 \text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$
	千卡每平方米小时开尔文	kcal/m ² ·h·K	瓦特每平方米开尔文	W/m ² ·K		$1 \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K} = 1.163 \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

注：常用非法定计量单位与法定计量单位相同者，本表未列出。

第一章 油田开采概述

地下储油层的石油依靠天然（或人工）能量，从地层中渗流向井底，从井底沿井筒流向井口，从井口沿地面集输管路，并经地面上油气集输系统一系列设备的初步加工，最后原油流至矿场原油库，天然气（油田气）输往压缩机站（或输气首站），以备外输。显然，油气集输系统实质上只是油气开采和油气外输之间的一个中间环节。

从工程角度看，可以把油田地面油气集输系统当做采油井的地面延伸部分。尽管原油在地层、井筒和地面的流动方式，流动规律不同，但整个过程只要是密闭的，则它们都处在同一水力系统之中。因而地面油气集输工程（包括集输方案、集输流程、集输设备的选择和管网的配置等）规划安排的好坏，不但直接影响采油工作的正常进行，而且也影响着油气资源的综合利用和油田开发的经济效益。所以，开发工作者应根据油田的地质资料，提出切合实际的最佳开发方案；采油工作者应采用相应的工艺措施实现开发方案，提高采收率，保持较高的采油速度和油田长期稳产高产；集输工作者应根据油田开发方案提供的不同时期油田生产能力，规划和设计油气集输系统的生产规模，保证做到采输平衡。为了使地面油气集输系统更好地为地下服务，掌握油、气在地面上的流动规律，学习集输作业的有关内容，做到油田地面集输工程的规划安排与油田开发方案相适应，必须对石油从地层向井底的渗流规律、从井底沿井身向井口的流动规律以及与油田开采有关的基础知识有一个概括的了解。

第一节 石油及油气藏

一、石油的生成及油气藏的形成

石油是怎样生成的，这是世界许多国家的石油地质学家长期争论的一个难题。从 18 世纪 70 年代至今，地质学家对石油的生成问题先后提出不下几十种学说。按照生成石油物质的化学性质，可以把这些学说归纳为两大学派：石油无机生成说和有机生成说。

石油无机生成说认为，石油是在地壳深处高温、高压条件下，由无机碳和氢经过化学作用而形成的。无机生成说在 19 世纪以前，曾经风靡一时，进入本世纪以后，遭到了大多数地质学家的反对，有机生成说渐渐地占了优势。

石油有机生成说认为，石油是由沉积岩中的有机物质变成的，也就是说由动物和植物的尸体、尤其以低等微生物为主的尸体在适当的地质环境条件下经过复杂的转化过程形成的。从勘探油气藏的几百年历史来看，人们发现全世界开发的几万个油气田中，其中 99.9% 以上的油气田都分布在沉积岩中，这个事实充分说明石油和天然气是在沉积岩中形成的。那么，它们是由沉积岩中的什么物质生成的呢？原来，沉积岩中含有丰富的有机物质，这些有机物质是动、植物死亡后在沉积岩的形成过程中保存下来的。我们已经知道，石油和天然气是

有机化合物的混合物，因此可以认为它们是沉积岩中的有机物质变成的，这是有机生成说的证据之一。另一方面，若把沉积岩中的有机物质和石油同时在实验室条件下进行分析，发现二者主要元素组成（重量百分比）是极其相似的（见表 1-1）。从表 1-1 可看出，有机

表 1-1 有机物质和石油的元素组成

元 素	沉积岩中的有机物质	石 油
碳	52~71%	83~87%
氢	7~10%	11~15%
氧	15~35%	少量~4%
氮	4~6%	少量~4%
硫		少量~4%

物质和石油都是以碳、氢元素为主，其次是氧、氮、硫等元素，这是共性。其不同之处就在于石油中的碳、氢含量高，而氧的含量则很低。这种成分上的相似性说明了它们成因上的联系。不同之处，正说明了有机质向石油转化的过程是碳、氢不断增加，氧不断减少的过程，也就是经过了“去氧、加氢、富集碳”的过程而转化成石油的。

总之，油、气的地质分布和它们与有机物质在化学成分上的相似性，都说明了油、气和有机物质有密切的亲缘关系，这种亲缘关系说明了石油是由有机物质变成的。人们还研究了现代海底、湖底的近代沉积，发现其中的有机物质也正朝着石油转化。

丰富的有机物质是生成油气的物质基础，但有机物质能否变成石油和天然气，还需要有适当的外界环境条件，即必须具备有还原条件，使有机物质得以埋藏和保存。在地质历史当中，生油过程多发生在古代曾经是浅海、海湾、泻湖或大陆上的湖泊等地区。这些地区阳光充足、温度适宜，良好的温暖潮湿气候便于各种生物大量滋生和繁殖，并在死亡后有可能就地沉积在水底；另外，这些水域地区的周围常常发育着许多河流，也有可能通过这些河流将大量的附近或远处的陆生或水生生物的尸体连同泥砂和其它矿物质一起冲来沉积在水底。大量陆生的有机物质同泥砂和其它矿物质一起，在低洼的浅海或湖泊中沉积下来形成的淤泥，称为有机淤泥。这是生油的原始材料。有机淤泥形成后又被新的沉积物迅速地覆盖埋藏起来，形成了与空气隔绝的还原环境，从而使其中的有机物质不可能腐烂成气体散失。

这些低洼区随着地壳的运动，边沉降边沉积，沉积物越积越厚。在漫长的地质历史期间，生油过程逐步地向更高级发展，使长期处于封闭还原环境条件下的极其丰富的有机物质被保存下来。随着有机淤泥埋藏深度的增加，它所承受的上覆沉积物的压力越来越大，温度越来越高。同时，在压力、热力、催化剂和微生物等作用下，处在还原环境中的有机物质经过一个漫长的“去氧、加氢、富集碳”的地质过程才形成分散的石油。这个漫长而又复杂的转化过程，往往要经历数百万年。国外从上新-更新统岩层中发现了值得开采的油藏这一事实说明，从有机物质变成石油并聚集成油藏所需的时间，最快也要一百万年左右。

有机生成说发展到今天，已经能够较圆满地解释目前所发现的油田其分布的规律性，因而已被广泛地应用于指导油田的勘探工作。

石油开始生成的时候，是非常细小的油滴，呈分散状态分布在沉积岩层中。要形成工业

上有开采价值的油田，必须把这些分散的油滴进一步聚集起来，同时还必须有适当的条件，使石油能够保存下来，不致于流失，这就不仅需要生油层和储油层，还需要有适当的地质构造和盖层。生油层、储油层和保护油气不致流失的盖层是形成油气藏必须的地质因素，三者缺一不可。

生油层就是生成石油的岩层，是自然界中石油和天然气生成的实际场所，是生油物质与生油环境的具体体现。生油层通常是泥岩或石灰岩。生油层一般都是致密的，不可能储存大量的石油。在地层的静压力和毛细管力作用下，生油层中的石油，沿着微细的裂缝孔道逐渐向有孔隙的岩层运移，最后聚集在有孔隙的岩层中。这种有足够孔隙可以聚集石油，并且石油可在其中流动的岩层，就叫储油层。砂岩和碳酸盐岩富于孔隙和裂缝，被认为是理想的储油层。盖层是位于储油层上面渗透性极低的致密岩层，常见的有泥岩、页岩、盐岩及致密的石灰岩和白云岩等。

石油运移到储油层以后，还不一定能形成油气藏，只有在运移的道路上遇到遮挡，不能继续前进时，才能聚集起来，形成油气藏。这种由于遮挡而造成的适于石油聚集的场所，通常称为圈闭。圈闭的存在是形成油气藏最重要的前提条件之一。储油层是具有储集石油空间的岩层；盖层是紧邻储油层的不渗透岩层，起阻止石油向上逸散的作用；遮挡物是指从各方面阻止石油逸散的封闭条件。遮挡物可以由盖层的拱形变曲造成，如背斜遮挡，也可以是由其它条件造成的。上述三者在一一定的地质条件下结合起来就组成了圈闭。当有足够的石油进入圈闭时，就会形成油气藏。在圈闭中只聚集液体石油的称为油藏，只聚集天然气的称气藏，同时聚集既有液体石油，又有天然气的则称为油气藏。因此，圈闭实质上就是指促成油气聚集的封闭形式。

油气藏是油气聚集的基本单元。若油气聚集的数量足够大，具有开采价值，则称为工业油气藏。如果油气聚集的数量不够大，没有开采价值，就称为非工业性油气藏。一个油气藏可以是一个单一油层（当储集层聚集了石油之后称为油层）；当剖面上油层之间的隔层不起遮挡油气运移作用时，一个油气藏可以是处于同一压力系统中的几个油层。

由单一构造控制下的同一面积范围内的一组油藏的组称称之为油田。显然，油藏和油田是不同的两个概念。一个油藏是受一个圈闭所控制，一个油田是由局部构造所控制，一个局部构造，例如背斜构造，在剖面上可以形成一个到几个圈闭，即可形成一个到几个油藏。所以，一个油田可以是一个油藏，也可包含几个乃至几十个油藏。前者称为单一型油田，后者称为复合型油田。

二、储集岩层的基本特征

如前所述，凡是能够储集石油和天然气，并且油、气能在其中流动的地下岩层称为储油、气岩层，简称储集层。它在油气藏形成中起着重要作用，是油气藏形成的重要条件之一。

一个油田往往包含有几个乃至几十个油藏，因而一个油田也就包含有很多层储集岩层。要全面认识和掌握一个油田，必须从认识每一个储油岩层开始。

储油岩层物理性质的优劣，是评价一个油层好坏的重要标志。不同的储油岩层，有不同的物理性质。各种物理性质，通常称作储油岩层的物理参数，可用数字来表示。这些数据是油田计算储量，制定开发方案和掌握油田动态的基本依据。因而，研究储油岩层的物理性质，对开发好油田有很重要的意义。储油岩层的物理性质参数主要包括有孔隙度、渗透率和含

油饱和度等。

1. 孔隙度

岩石中存在的孔洞和裂缝，便成了油气储存的场所和流动的通道。为了衡量岩石中孔隙总体积的大小，以表示岩石中孔隙的发育程度，提出了孔隙度的概念。

岩样中所有孔隙空间体积与该岩样总体积的比值，称为该岩样的总孔隙度，或称绝对孔隙度，以百分数表示，即

$$\phi_a = \frac{V_t}{V} \times 100 \quad (1-1)$$

式中 ϕ_a ——绝对孔隙度，%；

V_t ——岩石孔隙的总体积， m^3 ；

V ——岩石总体积， m^3 。

储集岩层的总孔隙度越大，说明岩石中孔隙空间越大。但是，岩石中不同大小的孔隙对流体的储存和流动所起的作用完全不同。有一些微毛细管孔道，流体在其中很难流动；另外，有一些孔隙的通道被泥质等所堵塞，油气只能储存在这些孔隙中，却不能流动。所以，对于油气开采来讲，只有那些互相连通的超毛细管孔隙和毛细管孔隙才有实际意义，因为它们不仅储存油气，而且允许油气在其中流动。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，在现代工艺条件下，也不能开采出来。因此，根据储集层岩石孔隙的储集条件，在绝对孔隙度的基础上，又提出了有效孔隙度的概念。

有效孔隙度是指那些互相连通，并在一般压力条件下允许流体在其中流动的孔隙体积之和与岩石总体积的比值，以百分数表示，即

$$\phi_e = \frac{V_e}{V} \times 100 \quad (1-2)$$

式中 ϕ_e ——有效孔隙度，%；

V_e ——岩石中有效孔隙体积， m^3 ；

V ——岩石总体积， m^3 。

从上述绝对孔隙度与有效孔隙度的大小来看，显然，有效孔隙度小于其绝对孔隙度，即 $\phi_e < \phi_a$ 。现场生产单位所说的孔隙度，都是指有效孔隙度。

2. 渗透率

岩石渗透性，是指在一定压力差下，岩石能使流体通过的能力，它仅仅反映油气被采出的难易程度，并不反映岩石内流体的含量。在开采石油和天然气时，油气之所以能不断地从岩层中流向井底，不但是因为周围岩层和井底之间对流体来说有压差存在，而且岩石本身又有渗透性的缘故。所以，渗透性是评价油层好坏即油气在岩石中流动难易程度的主要指标。

岩石渗透性的好坏，是以渗透率的数值大小来表示的，其数值大小根据达西的直线渗滤定律确定，即

$$k = \frac{q\mu l}{(p_1 - p_2)A} \quad (1-3)$$

式中 k ——渗透率， m^2 ；

q ——通过岩石的液体流量， m^3/s ；

A ——液体通过岩石的横截面积, m^2 ;

μ ——液体的粘度, Ns/m^2 ;

l ——岩石的长度, m ;

p_1-p_2 ——液体通过岩石前后的压差, N/m^2 。

由上式可以看出, 在一定的试验条件下, A 、 l 、 μ 和 (p_1-p_2) 是给定的常数, 则流量 q 与渗透率 k 成正比。 k 反映了岩石本身在压差作用下使流体通过的能力, 它的大小只决定于岩石的性质, 即决定于岩石的孔隙结构和孔隙大小, 而和所通过的液体性质无关。

储集岩层渗透率的研究在油田勘探开发中有重要的实际意义, 它对油层压力的分布, 油井产量以及地下油、水流动的方向和速度都有很大影响。

储集岩层的孔隙度、渗透率可在实验室通过岩样来测定。在油气田勘探和开发过程中, 根据需要, 常利用测井和试井资料求得渗透率, 它更能真实地反映实际生产能力。

实际资料研究证明, 岩石的绝对孔隙度与渗透率之间没有明显的数量关系, 例如一些粘土岩类绝对孔隙度很大(约 40%), 但实际上几乎是不渗透的; 碳酸盐岩的孔隙度一般小于 5%, 但有的渗透率却很高。然而, 有效孔隙度与渗透率之间的关系则较为密切, 一般来说, 有效孔隙度越大, 渗透率也越大, 渗透率随有效孔隙度的增加而有规律的增加。在油田开采中, 可以采用人工措施(如压裂、酸化等)改造油层, 增加有效孔隙度, 提高油层的渗透率, 进而提高油井产量和油层的采收率。孔隙性和渗透性是储集层两大基本特性, 两者直接影响到油气的储量和产量。

以上讨论渗透率时, 假定岩石孔隙中只有一种流体(单相), 而且这种流体与岩石不发生任何物理和化学反应, 在这种条件下测得的渗透率称为绝对渗透率。实际上, 在油层内流体的渗透情况要复杂的多。在油层内一般不可能只有单相流体, 常为两相(油-气、油-水、气-水)、甚至三相(油-气-水)流体并存, 这时测得岩石让某一相(油、气或水)流体通过的能力称作有效渗透率或相渗透率。有效渗透率不仅与岩石的性质有关, 而且也与其中流体的性质和该流体在岩石中的饱和度有关。饱和度越大, 相渗透率也越大, 当某种流体在岩石孔隙中含量达百分之百时, 该相流体的有效渗透率就等于绝对渗透率。相反, 随着该相流体在岩石孔隙中的含量逐渐减少, 有效渗透率则逐渐降低, 直到某一极限含量, 该相流体停止流动。

3. 含油饱和度

岩石孔隙中, 并不是全部为油所充满。在石油运移和储集过程中, 油不可能把沉积在岩石孔隙中的水全部置换出来, 在岩石孔隙中只有一部分体积被油所充满。因而, 在岩石中除石油外, 常含有天然气和水。含油饱和度是指油层孔隙中油的体积与其有效孔隙体积之比, 一般以百分数或小数表示, 即

$$S_o = \frac{V_o}{V_c} 100 \quad (1-4)$$

式中 S_o ——含油饱和度, %;

V_o ——岩石孔隙中含油的体积, m^3 ;

V_c ——岩石中有效孔隙的体积, m^3 。

纯油藏, 含油饱和度与含水饱和度(S_w)之和为 1, 即

$$S_o + S_w = 1 \quad (1-5)$$

油气藏，则油、气 (S_g)、水饱和度之和为 1，即

$$S_o + S_g + S_w = 1 \quad (1-6)$$

含油饱和度越大，表明油层中储油量就越多，因而它是用来计算油藏地质储量的重要参数。我国几个主要砂岩油田，其含油饱和度都在 60~80% 之间。

三、储集岩层中油的物理性质

以上讲述了储集岩层的几个主要物理性质。要全面认识和掌握一个油田，这还是不够的，还应了解、掌握储藏在储集岩层里的石油物性。

在地层压力、温度条件下，气体处于溶解状态，因而地层油的许多性质如粘度等与地面脱气原油有很大差异。在开采过程中，随着压力的降低，地层油的溶气量不断减小，物理性质不断变化，直至和地面脱气原油一致。

地层油的物理性质同储量计算，油田开发动态分析，合理制定开发工艺措施等都有着密切的联系。而地面脱气原油的一些物性对油气集输工程设计有着重要的意义。

1. 地层油的饱和压力

在地层压力、温度条件下，天然气溶解在原油中，其溶解度随压力的增高而增大，随温度的增加而降低。当全部气体保持溶解状态时，地层中只有液相石油。在石油从油层流至井口的过程中，压力不断下降，当压力下降到一定程度时，溶解在油中的天然气就从油中分离出来而成为油气两相。溶解气开始从油中分离出来时的压力叫饱和压力。它表征石油溶解天然气的压力界限。

应该指出，饱和压力在油田开采中是一个很重要的数据。一般情况下，在采油过程中，都要求井底流动压力高于饱和压力，即要求有一定的流饱压差，使油中的溶解气不易在井底析出，油气比就低，这样可以用较大的油嘴放大采油压差，提高油井产量和油田的采油速度。如果饱和压力低，井筒内自喷能量弱。如果井底流动压力低于饱和压力，则油里溶解气就会在油层中分离出来，油气比高，使油层渗透率降低，原油粘度增高，流动阻力增大，从而降低油井产量。因此，在油田开采过程中，必须尽早知道地层油的饱和压力，以便规定在一定的流饱压差界限以内采油。

2. 地层油原始溶解油气比

地层油中溶解气量的多少，常以溶解油气比表示。它是指在地层温度和原始油层压力下，单位体积脱气原油中所分离出的标准状态下的天然气体积。显然，饱和压力下的溶解油气比最大，地层压力低于饱和压力时，溶解油气比随压力的降低而减小，而地层压力高于饱和压力时，则溶解油气比不变。

溶解油气比的大小与温度、压力和油气组成有关，也与脱气方式有关。一级脱气得到的溶解油气比大于多级脱气。为了减少损耗，得到相对密度较低的脱气原油，在矿场油气集输中多采用多级脱气。油气集输工程中，地面油气两相混输管路的压降计算所用的溶解油气比，是指在管路温度和压力状态下的溶解油气比。由于工作条件不同，溶解油气比故有确切的含意。同样，地层油原始溶解油气比也是地层油的重要性质之一，在油田开发中有着广泛的用途，在此不再赘述。

3. 地层油的容积系数

由于地层油溶有气体，使其在地层与地面脱气后的体积不等。地层条件下的原油，由于

溶有大量气体，因而地层油的体积一般总是大于其地面脱气油的体积。为了了解地层油体积与其在地面脱气后体积的增减情况，引出地层油容积系数的概念。地层油的容积系数 B 是指地层油的体积与其在地面脱气后原油体积的比值，即

$$B = \frac{V_{s.o.}}{V_{e.s.o.}} \quad (1-7)$$

式中 B ——地层油的容积系数；

$V_{s.o.}$ ——地层油的体积， m^3 ；

$V_{e.s.o.}$ ——地面脱气后油的体积， m^3 。

地层油的容积系数 B 总是大于 1。地层油的容积系数与油气性质、溶解气量以及温度和压力有关。当油气组成和温度一定，压力等于地层油的饱和压力时，油中溶解的气量最多，地层油的体积最大，容积系数达到最大值。当压力继续升高时，溶气量不变，而地层油体积受压变小，所以容积系数随压力增加而变小。当压力小于饱和压力时，地层油中溶气量减小，地层油体积变小，所以容积系数也变小。地层油的容积系数一般在 1.08~1.6 之间。在油田动态分析和储量计算中，地层油的容积系数是一个重要的参数。

4. 地层油的粘度

无论在动态计算，还是在提高采收率的研究中，粘度都是影响原油产量的重要因素。

地层油的粘度比地面脱气油要小得多。地层油的粘度取决于油层温度、压力、溶气量及油的化学组成。地下温度高，液体分子之间的吸引力相对减弱，所以粘度小。地层油的粘度与压力也有密切关系，压力大于饱和压力时，随着压力的增大溶气量不变而地层油弹性压缩，密度增大，液层的内摩擦阻力也增大，油的粘度也随之上升；当压力降到饱和压力以下时，溶解在地层油中的气体从中分离出来，则油的粘度迅速增大；饱和压力下溶气量最大，油的密度最小，粘度也最小；地层油中含胶质、沥青质的数量越高，或重烃含量越多，油的粘度越大。

地层油的粘度直接影响到油田的开发与开采，我们必须根据地层油的粘度随温度、压力、溶气量的变化特点，掌握它的变化规律，从而采取适当措施，降低油的粘度，提高油井的产油量和采收率。

第二节 石油在地层中的渗流

石油之所以能够从油层流到井底，然后沿井身上升到地面，最根本的原因是石油具有能量。驱使石油流出油层的能量称为驱油能量。驱油能量表现为油层压力。油层压力不足，石油就不能流动，油井里的油就不能自喷到地面。能否从地下采出更多的石油，关键在于能否保持油层压力，这是油田开发的主要矛盾。为了解决这个矛盾，必须首先了解和掌握推动石油从油层流向井底的压力，即油层的自然能量。

一、油藏中的驱油能量

驱油能量表现为油层压力，归纳起来主要有以下几种：

1. 边缘水压力

油层被广大含水区包围着，含水区又与地面连通，并有江、河和湖泊等不断地向其供