



普通高等教育“十五”国家级规划教材

高等院校石油天然气类规划教材

油层物理学

杨胜来 魏俊之 编著

石油工业出版社
Petroleum Industry Press



普通高等教育“十五”
国家级规划教材



北京市高等教育
精品教材立项项目

高等院校石油天然气类规划教材

油 层 物 理 学

杨胜来 魏俊之 编著

石 油 工 业 出 版 社

5A753/03

内 容 提 要

本书研究油气藏开发所涉及的基本物理现象、物理过程以及物理量之间的关系。第一篇包括前四章,介绍了油气藏流体特性,包括原油物性、天然气物性、烃类相态特征、地层水物性等;第二篇为储层岩石的物理特性,包括第五章至第七章,分别介绍了岩石物性,包括孔隙性、渗透性、流体饱和度、储层敏感性、电学特性、热物性等内容;第三篇包括第八至第十章,分别介绍多相流体在孔隙介质中的分布与渗流规律,包括岩石润湿性、油水微观分布、毛细管压力、相对渗透率等。

本书是作为石油工程专业本科生教材而编写的,也可供石油高校相关专业使用,或供研究生及从事石油地质、采油工程、油藏工程、提高采收率等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油层物理学/杨胜来,魏俊之编著.

北京:石油工业出版社,2004.10

普通高等教育“十五”国家级规划教材.高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 7-5021-4678-4

I. 油…

II. ①杨…②魏…

III. 储油层-物理性质-高等学校-教材

IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第073277号

油层物理学

杨胜来 魏俊之编著

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

总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2004年10月第1版 2004年10月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:18.75

字数:470千字 印数:1—3000册

定价:28.00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

前 言

本书是根据石油工程专业本科生教学需要而编写的。主要介绍油气藏开发工程所涉及的物理化学现象、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、多孔介质中的多相渗流机理及其在石油工程中的应用。

作为本科生的教材,本书侧重介绍基本知识、基本理论、基本观点,注重广度。通过学习,应当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,使学生形成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。

由于篇幅所限,有些内容未能深入和展开论述,有兴趣的读者可参考有关专著或相关文献。本书是按 48 学时编写的,使用时要突出重点,不必面面俱到。必要时可辅之以实验讲义和习题集。

作为一本教科书,本书在参考近年来本课程的最新发展和国内外相关书籍的同时,主要继承了石油大学各个历史时期《油层物理》教材的优点和精华。在本书即将完稿时,正逢石油大学迎来建校 50 周年,谨以此书表达对 50 年来辛勤耕耘、为我国石油工业和石油教育事业做出开创性贡献的老教师们的敬意,是他们不懈努力,积累知识、传授知识,建立和发展了本学科知识体系及课程的基本模式。在此对各位老师和先辈的教诲及支持表示衷心的感谢。特别感谢张朝琛教授、郎兆新教授在百忙中审阅书稿,提出了许多修改意见。

本书的编写历时数载,早在 1999 年就由魏俊之主持编写了校内讲义,经过了试用和完善,又由杨胜来主持重新编写了讲义。这次编写以历次讲义为蓝本,参考国内外相关教材,博采众长,力争体现教材的先进性、科学性、完整性。为了便于汉英双语教学,书后附有汉英名词索引表。

李保振、杨清立、曹立天分别参加和协助了第一、第二和第三篇的编写,蒋利平、崔飞飞、李保振承担了大量的文字、图表处理工作。实验室李春兰、高旺来老师给予了很多帮助。石油大学教务处及石油工程系主管领导翟应虎、李相方、张士诚、吴晓东以及李宏伟、史庆老师,对本课程的建设和本书的出版工作一直给予支持和鼓励。我们的研究生和同学们对本书的编写也做了工作。在此一并表示感谢。

由于作者水平和学识所限,加之时间仓促,书中难免存在这样或那样的不足和错误,请广大师生和读者批评指正。

作 者
于北京昌平

目 录

绪论	(1)
----	-----

第一篇 储层流体的物化性质

第一章 油气藏流体的化学组成与性质	(4)
第一节 石油的化学组成	(4)
第二节 原油的物性与分类	(7)
第三节 天然气的化学组成	(12)
第四节 油气藏分类	(12)
第五节 地层水的化学组成与分类	(14)
第二章 天然气的高压物理性质	(18)
第一节 天然气的视分子量和密度	(18)
第二节 天然气的状态方程和对比状态原理	(21)
第三节 天然气的高压物性	(35)
第四节 天然气含水量和天然气水合物	(42)
第三章 油气藏烃类的相态和汽液平衡	(47)
第一节 油气藏烃类的相态特征	(47)
第二节 汽-液相平衡	(56)
第三节 油气体系中气体的溶解与分离	(68)
第四节 用相态方程求解油气分离问题的实例	(74)
第四章 储层流体的高压物性	(80)
第一节 地层油的高压物性	(80)
第二节 地层水的高压物性	(87)
第三节 地层油、气高压物性参数的测算	(90)
第四节 流体高压物性参数应用示例——油气藏物质平衡方程	(102)

第二篇 储层岩石的物理特性

第五章 储层多孔介质的几何特性	(107)
第一节 砂岩的构成	(107)
第二节 储层岩石的孔隙性	(117)
第三节 储层岩石的孔隙度	(123)
第四节 储层岩石的压缩性	(130)
第五节 储层岩石流体饱和度	(132)
第六章 储层岩石的流体渗透性	(136)
第一节 达西定律及岩石绝对渗透率	(136)
第二节 气测渗透率及气体滑动效应	(138)

第三节	影响岩石渗透率的因素	(142)
第四节	岩石渗透率的测定与计算	(145)
第五节	裂缝性、溶孔性岩石的渗透率	(152)
第六节	岩石结构的理想模型及应用	(155)
第七节	砂岩储层岩石的敏感性	(159)
第七章	储层岩石的其他物理性质	(171)
第一节	含流体岩石的导电特性	(171)
第二节	储层岩石的热学性质	(179)
第三节	储层岩石的声学特性	(180)

第三篇 储层中多相流体的渗流机理

第八章	储层岩石中的界面现象与润湿性	(182)
第一节	储层流体的相间界面张力	(183)
第二节	界面吸附现象	(190)
第三节	储层岩石的润湿性	(195)
第九章	储层多孔介质中的毛细管压力及毛细管压力曲线	(209)
第一节	毛细管压力的概念	(209)
第二节	岩石毛细管压力曲线的测定与换算	(217)
第三节	岩石毛细管压力曲线的基本特征	(225)
第四节	毛细管压力曲线的应用	(229)
第十章	孔隙介质中多相渗流特性与相对渗透率曲线	(234)
第一节	多孔介质中的多相渗流特性	(234)
第二节	两相渗流的相对渗透率	(239)
第三节	三相体系的相对渗透率	(249)
第四节	相对渗透率曲线的测定和计算	(251)
第五节	相对渗透率曲线的应用	(260)

附录一	公式推导	(268)
一、	公式 (10-8) 的推导	(268)
二、	不稳定法测算相对渗透率的公式推导	(268)
附录二	单位换算表	(271)
附录三	英汉技术术语索引	(274)
附录四	平衡比图版	(279)

参考文献	(291)
-------------	--------------

绪 论

一、石油天然气开发的重要意义

能源的开发和合理利用是整个社会发展的源泉和依据，决定着一个国家的竞争实力和综合国力^[1]。石油和天然气是重要的能源、优质的化工原料和重要的战备物资，已经受到各国的普遍重视。可以说，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和物资。

新中国成立 50 多年来，我国石油工业得到迅速的发展，年产量从解放前的 8.9 万吨^[2]，发展到近年来 1.6~1.7 亿吨，进入世界前四名的行列。但从 1997 年起我国已成石油净进口国；进入 21 世纪以来，石油年进口量达几千万吨，成为世界第二大石油消费国。今后，随着我国经济和社会的发展，对油气资源的需求量还将增加。因此，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）采取各种节能措施及可替代能源或新能源，减缓对石油需求的压力；（5）开展国际合作，参与开发国际油气资源。对于石油工作者来说，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，才能面向新的世纪，为我国石油工业的发展贡献力量。

二、油层物理学的研究内容与任务

油层物理学（petrophysics）是研究油（气）层物理和物理化学现象的科学，主要内容包括：

- （1）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相态变化规律）；
- （2）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）；
- （3）饱和多相流体的油气层的物理性质及多相渗流机理。

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。多孔介质岩石的性质在很大程度上决定着油、气、水在油藏岩石中的分布和流动规律，地下流体（油、气、水）的物化性质也影响其在多孔岩石中的流动状态。油、气、水在油藏中的分布和流动规律是油田开发的物理基础，是油田开发理论所研究的重要课题。

油层物理学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。

本课程的目的是使学生掌握油藏流体和岩石的基本物性、基本知识与概念，为学习后续课程和相关课程打下基础。

三、油（气）层物理学的发展概况

油（气）层物理学是一门比较年轻的学科，距今仅六七十年历史。在 20 世纪 30 年代，美国、前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的研究，前苏联 30 年代已有这方面的专著；1949 年美国人 M. 麦斯盖特所著的《采油物理原理》^[46]，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，从而指导了各种驱动

类型油气田的科学开发；1956 年原苏联莫斯科石油学院 Ф. И. 卡佳霍夫出版《油层物理基础》^[7]，把油层物理从采油工程中独立出来，建立了一个新的学科分支。

我国在 20 世纪 50 年代就有了从事油藏物理教学和研究的专业人员，在我国第一所高等石油院校（北京石油学院）聘请前苏联专家 И. К. 吉玛都金诺夫首次开设了《油层物理》课程，并开始培养研究生。我国东部大油田的相继发现与开发，使我国油藏物理科学研究不断前进；在北京和各大油田相继建立了研究院所，建立了有关油藏物理的各类实验室，开展了各方面的油藏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的试验研究，取得了一批批研究成果，专业人员队伍也随之不断发展和壮大起来。所以，我国油层物理学科是 50 年代前后形成，并随油田开发而不断发展。

60 年代起，我国相继出版了反映最新研究成果的有关油层物理的书籍。而在各种杂志上发表的有关文章就更多了。今天，油层物理已成为我国油田开发中不可缺少的知识部分。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。

在国外，70 年代，G. V. 奇林加等（1972）出版《碳酸盐岩石油天然气开采》^[54]，从开采角度叙述了碳酸盐岩储层特征，较系统全面地叙述了碳酸盐岩储层及其物理性质。D. 威廉等（1973）的《石油流体性质》^[4]，则比较系统地阐述了石油和天然气的物理化学性质和有关计算。

前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》^[55]则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的新著《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》^[23]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。

20 世纪末的研究和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。21 世纪的油层物理学不论是研究的深度还是广度上，都将进入一个崭新的阶段。油层物理学今后的发展，将体现几个特点：

- （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藏的实际条件和开发过程。

经过国内外几代学者的努力，目前油层物理学已经初步形成比较完善的理论体系，实验测试技术也趋于规范化，在常规岩心分析、专项岩心分析、提高采收率试验、地层敏感性的流动试验、地层流体物理分析等方面形成比较定型的方法，形成了一批行业标准。

然而我们也应看到，由于油藏岩石和流体的非均质性和油藏物理现象的复杂性，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。但随着对实际问题的深入研究，油层物理学必将继续发展。

四、本课程的目的与学习方法

油层物理学是高等石油院校石油工程专业、油田化学专业、地质工程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。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。

油层物理学是一门建立在实验基础上、理论与实践并重的课程。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。同学们务必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。

本书以我国的法定计量单位为主，同时介绍常用工程单位，引用的个别例题仍保留原欧美单位制，读者务必掌握公式的单位制及其应用。

第一篇 储层流体的物化性质

储层流体是指储存于油（气）藏中的石油、天然气和地层水。由于其处于几千米深的地下，原始状态储层流体处于高压、高温状态。高压下原油溶解有大量的天然气，从而使处于地下的油气藏流体的物理性质与其在地面的性质有着很大的差别。在储层流体从储层中渗流至井底、再从井底流至地面的过程中，流体的压力、温度、体积不断发生变化（温度、压力降低），并伴随有原油脱气、体积收缩、原油析蜡、气体体积膨胀等变化。这些变化对石油天然气生产均有一定的影响。研究生产过程中的物性变化是正确确定和优化生产工艺参数的必然要求。

在勘探或开发设计阶段，必须根据流体物性进行油气田科学预测，例如判断油藏类型、油藏有无气顶、气藏气体是否会在地层中凝析等，这些都需要对油气的物理化学特性及相态变化规律有深刻的认识，才能进行正确判断和设计。

油田开发过程中，必须掌握有关地下流体的动、静态物理参数，如石油和天然气的体积系数、溶解系数、压缩系数、粘度等，才能进行油藏工程研究和生产管理。

因此，了解和掌握石油、天然气和地层水的性质及其变化规律，掌握它们的高压物性参数，是科学高效地进行油气藏开发的必然要求。

第一章 油气藏流体的化学组成与性质

石油与天然气从化学组成上讲为同一类物质。现已确定石油中烃类主要是由烷烃、环烷烃和芳香烃这三种饱和烃类构成。原油中一般未发现非饱和烃类，如烯烃、炔烃。烷烃又称石蜡族烃，其化学通式为 C_nH_{2n+2} 。烷烃由于其分子量大小不同，存在的形态也不同。在常温常压下， $C_1 \sim C_4$ 为气态，它们是构成天然气的主要成分； $C_5 \sim C_{15}$ 是液态，它们是石油的主要成分；而 C_{16} 以上的烷烃为固态，即所谓石蜡。石油中固态烃能以溶解或结晶状态存在于石油中。因此，石油与天然气在化学结构上均为烃类，只是分子量不同而已。

第一节 石油的化学组成

一、石油的元素组成

对于石油的化学组成的研究，首先从分析其元素组成入手。石油中主要含碳、氢元素，也含有硫、氮、氧元素以及一些微量元素。

表 1-1 是国内外一些原油的碳、氢元素含量。可以看出，虽然原油产地不同，物性差别也很大，但石油的碳、氢元素组成变化确在很窄的范围内。其中碳的含量（质量百分比）为 83%~87%，氢含量（质量百分比）为 11%~14%，两者合计一般为 95%~99%。由表

中氢/碳原子个数比可知，我国一些重要原油的氢/碳原子个数比较高。

表 1-1 原油的碳、氢元素含量示例

原油产地	元素含量（质量分数），%			H/C 原子个数比
	C	H	C + H	
大庆（原油）	85.7	13.3	99.0	1.86
胜利（混合原油）	86.3	12.2	98.5	1.68
克拉玛依（原油）	86.1	13.3	98.4	1.85
大港（混合原油）	85.7	13.4	99.1	1.88
加拿大	83.4	10.4	93.8	1.60
墨西哥	84.2	11.4	95.6	1.62
伊朗	85.4	12.8	98.2	1.80
哥伦比亚	83.6	11.9	95.5	1.67
罗马尼亚	87.2	11.3	98.5	1.56
（俄）杜依玛兹	83.9	12.3	96.2	1.76

石油中非碳、氢元素（硫、氮、氧）总含量不过 1%~5%（有的石油，例如委内瑞拉石油含硫高达 5.5%）。但是这些元素都是以碳氢化合物的衍生物形态存在于石油中，因而含有这些元素的化合物所占的比例就要比 1%~5%大得多。这些元素的存在，对于石油的性质有很大影响，必须充分予以重视。

我国大部分原油的硫含量都比较低，例如，大庆和大港原油含硫量仅为 0.12%；即使是我国含硫较高的原油（孤岛和江汉原油），其含硫量与世界各地的高含硫原油相比较也不算很高（表 1-2）。

表 1-2 石油中硫、氮元素含量

原油产地	元素含量（质量分数），%	
	硫	氮
大庆	0.12	0.13
胜利	0.80	0.41
孤岛	1.8~2.0	0.50
大港	0.12	0.23
任丘	0.30	0.38
江汉	1.83	0.30
世界各地原油的最高含量	5.50	0.77
世界各地原油的最低含量	0.02	0.02

我国原油的含氮量偏高。曾统计过国外 210 个原油油样的含氮量数据，其中含氮量高于 0.3%的原油油样只有 31 个，而我国原油大部分的氮含量在 0.3%以上。

石油中还含有一些微量稀有金属元素如钒、镍、铁、钴、镁、钙、铝等，含量极微，一般在 0.003% 以下。

二、石油中烃类化合物

从化学组成来看，石油可分为两大类，即烃类和非烃类。烃类和非烃类的相对含量，因石油的产地不同，差别也很大。有的石油（轻质石油），烃类含量可达 90% 以上，但有的石油（重质石油）烃类含量低于 50%，甚至低到 10%~15% 左右。

1. 石油中的烷烃

在石油中带有直链或支链，但没有任何环结构的饱和烃，称之为烷烃（或链烃）。烷烃的化学性质很不活泼，在一般条件下不易发生反应。但在加热或催化剂以及光化学作用下，烷烃能起各种反应，例如卤化、磺化、氧化以及裂化等反应。

石油中烷烃包括正构烷烃和异构烷烃。正构烷烃一般含量都很高，尤其是石蜡基原油其正构烷烃含量往往大于同碳数的所有异构烷烃含量的总和。例如，我国大庆原油在 60~140℃ 汽油馏分中，正构烷烃含量为 38%，而异构烷烃总量只有 15%。但对于沥青基原油，其正构烷含量较低。例如，国外某些原油（如 Borneo 原油）正构烷含量低于 1%。

在异构烷烃中，以带有两个或三个甲基的衍生物含量最多，而带四个甲基及其他高分支的异构烷烃的含量较少。

2. 石油中环烷烃

环烷烃是环状的饱和烃，其性质也比较稳定，是石油主要的组成之一。有机化学家曾经合成各种碳数的环烷烃。但是，在石油中大量存在的却只有含五碳环的环戊烷系和六碳环的环己烷系。

石油中的环烷烃除了单环环烷烃外，还有双环及多环环烷烃。石油中的双环环烷烃两个环可能都是五碳环或六碳环，也可能是一个为五碳环，另一个为六碳环。环的连接方式以并连为主。石油中也存在三环及多于三环的环烷烃。

3. 石油中的芳香烃

苯系芳香烃在石油中普遍存在。根据资料介绍，曾从美国产石油中分离出带有不同碳数烷基侧链的苯同系物 40 余种。侧链可以是烷基的，也可以是环烷基的。我国大庆、胜利、任丘、新疆等地原油的汽油馏分中（<160℃），已定量测定的 100 多种单体烃中，苯系芳香烃约有 10 余种。

三、石油中的非烃类化合物

硫、氮、氧这些元素通常以各种含硫、含氧、含氮的烃类化合物的形态以及兼含有硫、氮、氧的胶状、沥青状物质的形态存在于石油中。因为已不是纯粹的碳氢化合物，所以被统称非纯烃类化合物，俗称非烃类。显然，它们都是极性物质。

含氧化合物——环烷酸、苯酚和脂肪酸等；

含硫化合物——硫化氢、硫醇、硫醚和噻吩等，此外石油中还含有元素硫；

含氮化合物——吡咯、吡啶、喹琳、吲哚和咔唑等杂环化合物；

胶质和沥青质——石油中的胶质—沥青质亦属于非烃化合物，它们多是高分子杂环的氧、硫、氮化合物，具有较高的或中等的界面活性，它们对石油的许多性质，诸如颜色、密度、粘度和界面张力等都有较大的影响，了解这类化合物的性质对提高原油采收率尤为重要。

四、原油的分子量、含蜡量及胶质、沥青质含量

1. 原油的分子量

原油中最小的分子是分子量为 16 的甲烷；最大的分子是沥青质，其分子量可达几千。因此原油的分子量变化范围很大，大约为几百。

2. 含蜡量

含蜡量是指在常温常压条件下原油中所含石蜡和地蜡的百分比。石蜡是一种白色或淡黄色固体，由高级烷烃组成 ($C_{16} \sim C_{35}$)，分子量 300~450，熔点为 37~76℃。地蜡是指碳原子数为 36~55 的高沸点结晶烃，分子量为 500~730，熔点为 60~90℃，其结构更复杂。石蜡和地蜡在地下以胶体状溶于石油中，当压力和温度降低时，可从石油中析出。

3. 胶质含量

胶质是指原油中分子量较大 (约 300~1000)，含有氧、氮、硫等元素的多环芳香烃化合物，通常呈半固态分散状溶解于原油中。胶质易溶于石油醚、润滑油、汽油、氯仿等有机溶剂中。胶质含量是指原油中所含胶质的质量百分数，一般在 5%~20% 之间。

4. 沥青质含量

沥青质是一种高分子量 (1000 以上)、具有多环结构、呈黑色固态的非纯烃类化合物。不溶于酒精和石油醚，易溶于苯、氯仿、二硫化碳。原油中沥青质的含量较少，一般小于 1%。当沥青质含量较高时，原油质量变坏。

从胶质到沥青质是渐变的过程，是以分子量的大小而划分的。两者的差别是：(1) 胶质是粘稠液体，而沥青质是无定形的、脆性的固体。(2) 胶质溶于低分子烷烃，沥青质则不溶。

5. 含硫量

指原油中所含硫 (硫化物或单质硫) 的百分数。原油中含硫量较小，一般小于 1%；但对原油性质的影响很大，对管线有腐蚀作用，对人体健康有害。

国内外油田原油性质数据示例见下节 (表 1-3、表 1-6、表 1-7)。

第二节 原油的物性与分类

一、原油的物理性质

原油物理性质指颜色、密度、粘度、凝固点、溶解性、发热量、荧光性、旋光性等。本节所讲的内容，侧重于地面商品原油的物理性质。

1. 颜色

一般呈棕褐色、黑褐色、黑绿色，也有黄色、棕黄色和浅红色石油。原油颜色的不同，主要与原油中轻、重组分及胶质和沥青质含量有关，胶质、沥青质含量高则原油颜色变深。所以原油的颜色深浅大致能反映原油中重组分含量的多少。

2. 原油的密度与相对密度

原油的密度是指单位体积原油的质量，其数学表达式为：

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o} \quad (1-1)$$

式中 ρ_o ——原油的密度， kg/m^3 ；

m_o ——原油的质量， kg ；

V_o ——原油的体积， m^3 。

地面原油的相对密度定义为原油的密度 (ρ_o) 与某一温度和压力下水的密度 (ρ_w) 之比。我国和前苏联国家习惯上是指 1atm、20℃ 时原油与 1atm、4℃ 纯水的密度之比, 用 d_4^{20} 表示。欧美国家则以 1atm、60°F (15.6℃) 时原油与纯水的密度之比, 用 γ_o 表示。由于温度条件不相同, γ_o 与 d_4^{20} 意义不同, 其数值也不同, 使用时应当注意。两者的关系为 $\gamma_o \approx 1.002 \sim 1.004 d_4^{20}$ 。

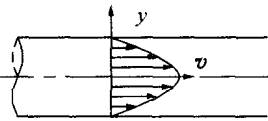
欧美国家还常以 API 度 (America Petroleum Institute——美国石油学会) 表示相对密度。它与 60°F (15.6℃) 原油相对密度的关系用下式换算:

$$API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 \quad (1-2)$$

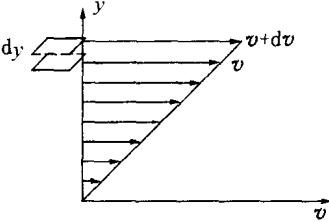
根据上式, 水的 API 相对密度是 10, 而原油的 API 相对密度是随 γ_o 降低而增加。实际上, 原油在一定的温度和压力下, 随着气体在原油中溶解度增加, API 度相对密度也增加 (即与溶解度成正比), 这是用 API 相对密度表示地下原油密度的优势。

3. 凝固点

原油的凝固点是指原油冷却时由流动态到失去流动性的临界温度点, 它与原油中的含蜡量、沥青胶质含量及轻质油含量等有关, 影响因素十分复杂。轻质组分含量高, 则凝固点低; 重质组分含量高, 尤其是石蜡含量高, 则凝固点就高。原油凝固点在 -56~50℃ 之间。凝固点高于 40℃ 的原油称为高凝油。



(a) 圆管内



(b) 平板间

我国多为石蜡基原油, 原油含蜡量高, 凝固点高。例如大庆原油含蜡量高达 25%~30%, 凝固点在 25~30℃ 左右; 辽河沈北油田高凝油凝固点高达 40℃ 以上。

4. 原油的粘度

地层流体——油、气、水均为粘性流体。粘度是粘性流体流动时内部摩擦而引起的阻力大小的量度。流体的粘度定义为流体中任一点上单位面积的剪应力与速度梯度的比值。粘度的高低表明流体流动的难易, 粘度越大, 流动阻力越大, 越难流动。

如图 1-1 所示, 设两层平行流体, 层间间距为 dy , 其层面积为 A , 下层流动速度为 v , 上层速度为 $v + dv$, 其层间内摩擦阻力为 F 。根据牛顿内摩擦定律, 得:

$$\frac{F}{A} \propto \frac{dv}{dy} \quad (1-3)$$

引入一个系数, 写成等式关系则有:

$$\mu = \frac{F/A}{dv/dy} \quad (1-4)$$

式中 μ ——流体粘度, 又称动力粘度或绝对粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

F/A ——单位面积上的剪应力或内摩擦阻力, N/m^2 或 Pa ;

dv/dy ——速度梯度, s^{-1} 。

粘度的单位在 SI 制中为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕斯卡·秒)。石油工程中常用 P (泊)、 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ (毫帕秒)、cP (厘泊), 其单位换算如下:

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ 泊(P)} = 100 \text{ 厘泊(cP)} = 10^6 \text{ 微泊}(\mu\text{P})$$

$$1\text{mPa} \cdot \text{s} = 1\text{cP}$$

流体的粘度还可以用运动粘度来表示，它是相同状态（ p ， T ）下绝对粘度与密度之比：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

式中 ν ——运动粘度， m^2/s ；

μ ——动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

ρ ——流体密度， kg/m^3 。

此外描述石油产品规格的还有赛氏粘度、雷氏粘度、恩氏粘度等。它们都是条件粘度，是用特定仪器在特定条件下测定的。不同粘度计所测定的粘度数值、单位和表示方法各不相同。

表 1-3 为我国一部分油田原油的性质。由表中可以看出，这些油田原油的相对密度都在 0.86 以上。美国《油气杂志》1976 至 1978 年刊登的“世界原油指南”102 个原油相对密度数据中，有 44 个原油相对密度大于 0.86。因此单从相对密度看，这些原油属较重原油。

表 1-3 我国一些原油样品的某些性质

产地 性质	大庆 原油	胜利 原油	任丘 原油	辽河 原油	新疆黑油 山原油	克拉玛依 3号低凝油	胜利油田 孤岛原油	大港羊三 木原油
相对密度 d_{40}^{20}	0.8554	0.9005	0.8837	0.8662	0.9149	0.8839	0.9495	0.9437
粘度 (50℃), $\text{mPa} \cdot \text{s}$	17.3	75.1	50.5	7.8	316.2 ^①	29.2	316.8	595.8
凝固点,℃	30	28	36	17	-22	-54	2	-4
含蜡量 (吸附法),%	26.2	14.6	22.8	13.5 ^②	0.77	1.05	4.9	—
沥青质, %	0	5.1	2.5	0.17	1.36	0.53	2.9	0.4
胶质, %	8.9 ^③	23.2	23.2	14.4	21.2	13.3	24.8	21.8
残炭 (电炉法), %	2.9	6.4	6.7	3.59	5.3	3.8	7.4	6.0
备注	中高密度原油				低凝点、高密度原油			

①40℃粘度；②蒸馏法；③氧化铝吸附色谱的分析数据。

5. 闪点

闪点或闪火点是指可燃液体的蒸气同空气的混合物在临近火焰时能短暂闪火时的温度。大气压力对闪点也有一定的影响，因而通常测定的闪点都以标准压力 101.33kPa 下的数值表示。原油闪点一般在 30~180℃之间。

6. 荧光性

原油在紫外光照射下发出一种特殊光亮的特征称为原油的荧光性。原油发荧光是一种冷发光的现象。冷发光现象取决于化学结构，发光现象是含芳香族环状化合物的特征，饱和烃化合物则不发光。原油中不同组分的荧光颜色是不同的：轻胶质发绿色；重胶质发黄色；沥青质发褐色。原油密度不同使荧光颜色有明显的差异（见表 1-4）。

7. 旋光性

原油的旋光性是指偏光通过原油时，偏光面对其原来的位置旋转一定角度的光学特性。偏光面旋转的角度叫旋光角。原油的旋光角一般小于 1，极个别的可以大于 1。

8. 导电率

原油（碳氢化合物）为非极性物质，是非导体，原油的电阻率为 $10^{11} \sim 10^{18} \Omega \cdot \text{m}$ 。无

水原油的介电常数变化很小，在 1.86~2.38 之间，同空气的介电常数（1.0006）相近。

表 1-4 不同密度原油的荧光颜色

密度, g/cm ³	荧光颜色
>0.9659	棕色
0.9659~0.9042	橘红色
0.9042~0.8498	黄色—乳白色
0.8498~0.8251	白色
<0.8251	白色—紫色

二、地面原油的分类

地面原油通常按石油商品性质分类和评价，这里仅列举几种原油的分类方法。

(1) 根据原油中硫的含量可把原油分成为：

低硫原油——原油中硫的含量在 0.5% 以下；

含硫原油——原油中硫的含量在 0.5%~2.0%；

高硫原油——原油中硫的含量在 2.0% 以上。

原油中含硫具有不好的气味，而且对炼油不利，燃烧生成二氧化硫污染环境。石油产品中的硫化物是最不希望有的杂质，有的国家规定石油产品必须除去硫以后才能出售。我国多数油田的原油是少硫原油。

(2) 根据原油中胶质—沥青质的含量可将原油分为：

少胶原油——原油中胶质—沥青质含量在 8% 以下；

胶质原油——原油中胶质—沥青质含量在 8%~25% 之间；

多胶原油——原油中胶质—沥青质含量在 25% 以上。

胶质—沥青质在原油中形成胶体结构，它对原油的流动性具有很重要的作用，对石油的许多性质亦有较大的影响。我国玉门、胜利等油田生产的原油属胶质原油或少胶原油。

(3) 根据原油中的含蜡量可将原油分为：

少蜡原油——原油中含蜡量在 1% 以下；

含蜡原油——原油中含蜡量在 1%~2% 之间；

高含蜡原油——原油中含蜡量在 2% 以上。

原油中的含蜡量常常影响其凝固点，含蜡量越高其凝固点则越高。它对采油和原油输送都带来不少麻烦。我国大庆等油田所产的原油多属含蜡原油。

(4) 按原油的关键组分划分为：

凝析油——密度小于 0.82g/cm³ (20℃) 的原油；

石蜡基原油——密度 0.82~0.89g/cm³ (20℃) 的原油；

混合基原油——密度 0.89~0.93g/cm³ (20℃) 的原油；

环烷基原油——密度大于 0.93g/cm³ (20℃) 的原油。

(5) 根据地面脱气原油相对密度分类：

表 1-5 是国际上按原油的品位质量的分类方法，我国大多数油田属于中质或重质品位。

表 1-6 和表 1-7 分别给出国内外油田的地面原油性质。

表 1-5 原油按密度分类

相对密度 分类	γ_0	API 度
轻质油	<0.855	>34
中质油	$0.855\sim0.934$	$34\sim20$
重质油	>0.934	<20

表 1-6 我国一些油田的原油性质

原油	性质	相对密度 d_{4}^{20}	50℃粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}$	凝固点 $^{\circ}\text{C}$	含蜡量 $\%$	胶质 $\%$	沥青 $\%$	含硫 $\%$	残炭 $\%$	馏分组成, %		
										初馏点	$<200^{\circ}\text{C}$	$<300^{\circ}\text{C}$
大庆油田 S 区		0.8753	15.2	24	28.6	13.3	—	0.15	2.5	88	14	28
胜利油 T 区 S_2 层		0.8845	33.3	33	17.9	18.3	3.1	0.47	5.5	79.5	9	20
孤岛油田 G 层		0.9547	408.1	-12	0	27.5	6.6	2.25	8.95	15.8	1.9	11.2
大港油田 M 层		0.9174	47.7	-12	6.17	13.98	6.27	0.13	4.81	97	40	20.5
克拉玛依油田		0.8699	16.7	-50	2.04	12.6	0.01	0.13	3.7	58	18	35
玉门油田 L 层		0.858	11.1	-15.5	8.3	22.6	—	—	—	—	—	—
江汉油田 W 区 C_3 层		0.9744	—	21	3.8	51	9.6	11.8	9.5	89	5	218
辽河油田 C 区 S_1 层		0.9037	33.8	-7	4.73	17.6	0.15	0.26	6.4	—	—	—
川中油田		0.8394	10.3	30	18.1	3.4	—	—	—	—	—	—
任丘油田 P_z 层		0.8893	56.5	33	22.6	20.7	—	2.35	—	148	—	—

表 1-7 部分国外油田的原油性质

原油	物 性	相对密度 d_{4}^{20}	粘度 $\text{mPa}\cdot\text{s}/(\text{温度})$	凝固点 $^{\circ}\text{C}$	含蜡量 $\%$	胶质 $\%$	沥青质 $\%$	含硫 $\%$	残炭 $\%$
哈西-迈乌得油田 (阿尔及利亚)		0.804	2.769/ (20℃)	-45.5	2.40	0	0.06	0.13	0.83
基尔库克油田 (伊拉克)		0.844	4.61/ (20℃)	-36	3.9	—	1.5	1.95	3.8
欣塔油田 (印度)		0.856	23.7/ (50℃)	43.3	29.3	—	19.5	0.08	—
玻牟油田 (尼日利亚)		0.78~0.95	4.4 / (37.7℃)	17.78	5.1	—	—	0.16	—
阿加贾里油田 (伊朗)		0.852	6.56/ (21℃)	—	中等	—	0.60	1.42	—
帕那油田 (加拿大)		0.8988	—	10.0	—	—	—	0.29	1.76
东得克萨斯油田 (美国)		0.827~0.835	3.4 (15.6℃)	—	—	—	—	0.21	—
罗马什金诺油田 (前苏联)		0.868	7.3/ (50℃)	-38.89	4.3	—	—	1.61	—

三、地层原油的分类

粘度是地层油的主要物性之一，它决定着油井产能的大小、油田开发的难易程度及油藏的最终采收率。按粘度分为：

低粘油——指油层条件下原油粘度低于 $5\text{mPa}\cdot\text{s}$ 者。

中粘油——油层条件下原油粘度 $5\sim20\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

高粘油——油层条件下原油粘度 $20\sim50\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。