



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

油层物理学

第3版

■ 李爱芬 主编



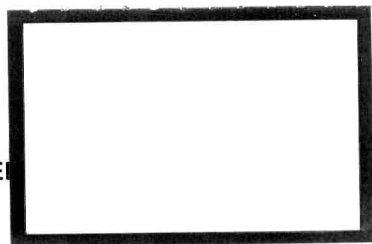
中国石油大学出版社

联系电话 400041315 或 010-8191388 直拨
刮涂层 输密码



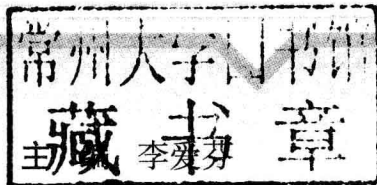
TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材



油层物理学

(第3版)



编者 张志英 崔传智 孙仁远
姚同玉 孙致学

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油层物理学/李爱芬主编.—3版.—东营:中国石油大学出版社,2011.10

ISBN 978-7-5636-3544-3

I. ①油… II. ①李… III. ①油层物理学 IV. ①TE311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 160881 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 油层物理学

作 者: 李爱芬 等

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛双星华信印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180 mm×235 mm 印张: 27.25 字数: 545 千字

版 次: 2011 年 10 月第 3 版第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

前言

《油层物理学》是石油工程专业学生的必修课。本书是石油工程专业教材体系建设的一部分,是按石油工程专业培养目标和课程设置的要求而编写的。本书可作为海洋石油工程、石油地质、石油地球物理、油田化学等专业的参考教材,也可作为石油矿场、油藏工程技术人员和地质工程技术人员的参考书。

全书共分四章。

第一章 储层流体的物理性质 在介绍储层流体(油、气、水)的化学组成、油气藏分类的基础上,重点讨论油藏中油、气相态描述及测定方法,油气的分离及计算,以及油、气、水高压物性参数的定义、特征、高温高压(PVT)物性测定原理及方法、经验确定方法等。

第二章 储层岩石的物理性质 主要讨论储层岩石的骨架特征,孔、渗、饱特征及其测定原理与方法,粒度及孔隙大小评价指标,储层胶结物性质及其敏感性评价测定方法,岩石经典渗流模型及其应用与发展状况,岩石导热、声学及导电性等的描述方法;介绍各物性参数在油藏评价及开发中的应用。

第三章 饱和多相流体的油藏岩石的渗流特性 从储层岩石以及其中流体的界面系统、界面特征出发,着重讨论储层岩石的毛管力理论、多相流体渗流理论;介绍毛管力曲线、相对渗透率曲线等的测试、计算方法及其在油田开发中的应用。

第四章 提高原油采收率的机理及应用 通过介绍采收率及其影响因素,讨论化学驱、混相驱及热力采油等主要提高采收率措施的方法及机理,讨论剩余油确定方法、相似准则及在物理模拟中的应用等,并讨论油层物理在提高采收率中的应用。

本次修订反映了国内外技术发展的动向,突出了系统性和实用性:

(1) 注重各章节的体系特点和内容连贯,考虑与前修和后续相关专业课内容的衔接与交叉;

(2) 在实用性上,突出基本概念、基本理论的分析应用,并扩充实用经验公式和实验方法的介绍;

(3) 在新颖性上,收集和参考了大量的国内外文献,吸收了国外教材的部分内容,汇

集了本学科近 10 年的新技术和新成果。

本书是在 2003 年 9 月第 2 版的基础上修订的,每章内容都做了较大修改、补充和完善,并补充了大量例题。全书共四章:第一章由李爱芬编写,第二章由崔传智编写,第三章由张志英编写,第四章第一、第二节由姚同玉和孙仁远编写,第四章第三、第四节由李爱芬、崔传智、孙致学、吕爱民、王月英、袁忠超、李亚军、张东等编写,全书最后由李爱芬统稿。实验室的张俨斌和部分研究生(谢昊君、司志梅、唐健健、孙静静、顾倩倩等)对本书的编写也做了大量的工作,在此一并表示感谢。

尽管我们在编写过程中尽了最大的努力,但不足之处在所难免,恳请广大读者提出意见和建议。

编者

2011 年 5 月

目 录

绪论	1
第一章 储层流体的物理性质	4
第一节 储层烃类的组成及分类	4
第二节 储层烃类的相态特征	14
第三节 油气体系的分离与溶解	26
第四节 天然气的高压物性	46
第五节 地层原油的高压物性	85
第六节 地层水的高压物性	113
习 题	120
思考题	125
第二章 储层岩石的物理性质	126
第一节 砂岩的骨架性质	126
第二节 储层岩石的孔隙度	138
第三节 储层岩石的渗透性	161
第四节 储层流体饱和度	187
第五节 岩石的胶结物及胶结类型	200
第六节 毛细管渗流模型及其应用	217
第七节 储层岩石的其它物理性质	221
习 题	229
思考题	231

第三章 饱和多相流体的油藏岩石的渗流特性	232
第一节 油藏流体的界面张力	232
第二节 油藏岩石的润湿性和油水分布	244
第三节 油藏岩石的毛管力	257
第四节 储层岩石的相对渗透率	290
第五节 微观渗流机理	319
习 题	323
思考题	327
第四章 提高原油采收率的机理及应用	328
第一节 采收率及其影响因素	328
第二节 提高原油采收率方法简介	342
第三节 剩余油研究方法	364
第四节 相似理论及其在物理模拟中的应用	377
思考题	397
附 录	398
附录 A 不同温度下烃类的饱和蒸气压	398
附录 B 典型体系的平衡常数图版	399
附录 C 离心法端点排驱压力及饱和度公式的推导	413
附录 D 不稳定法测相对渗透率公式的推导	416
附录 E 公式(3-5-3)的推导	419
附录 F 公式(3-5-5)的推导	420
附录 G π 定理的证明	421
参考文献	424

绪 论

一、油气资源现状及地位

人类大规模地开发、利用石油和天然气资源已有 100 多年的历史。石油和天然气已成为现代文明社会中不可缺少的物质材料之一,已渗透到世界经济的各个领域。从世界范围内统计,以石油和天然气为基础发展起来的化学工业、汽车制造业、航运业及纺织业等在提供就业机会与创造产值等方面,分别超过世界经济总量的 1/4。

石油是当今世界的主要能源,是关系国家经济命脉的重要战略物资,在世界能源结构中占据主导地位。一个世纪以来,石油的发展影响着全球经济,推动着人类社会的发展进程^[1]。

新中国成立 60 多年来,我国的石油工业得到迅速的发展,年产量从解放前的 $8.9 \times 10^4 \text{ t}$ ^[2],发展到 1980 年的 $1.38 \times 10^8 \text{ t}$ 和 2010 年的 $2.03 \times 10^8 \text{ t}$,成为世界第四大产油国。20 世纪 90 年代以来,我国石油消费进入快速增长时期,1980 年石油消费量约为 $0.8757 \times 10^8 \text{ t}$,1990 年约为 $1.15 \times 10^8 \text{ t}$,2000 年约为 $2.21 \times 10^8 \text{ t}$,2010 年达到 $4.49 \times 10^8 \text{ t}$,创历史新高。自 1993 年起,我国从石油出口国变为石油净进口国后,石油进口量增长很快,2010 年原油进口 $2.39 \times 10^8 \text{ t}$,依存度超过 55%。石油供需矛盾日益尖锐,已经成为制约经济和社会发展的瓶颈^[3]。因此,石油产量要满足国民经济现代化及可持续发展的要求,必须:① 加大勘探力度,寻求新的油气田,扩大油气后备储量;② 发展石油开采技术,最大限度地合理开发油气藏,提高现有油气田的采收率,增加油气产量;③ 采取各种节能措施及可替代能源或新能源,缓解对石油需求的压力;④ 开展国际合作,参与国际油气资源的开发。对于石油工作者来说,实现上述途径的基础是系统掌握油气藏勘探、开发方面的基础理论和方法,通晓寻找油气资源、合理开发油气藏、增加油气产量所必需的知识,具有应对国际市场的业务能力和英语能力。

二、油层物理学研究内容及与其它课程之间的关系

油层物理学是以油层为对象,用物理和物理化学的方法研究与油气田勘探、开发有关的物理和物理化学现象的科学,是石油工程专业的必修课程。

1. 油层物理学研究的主要内容

- (1) 储层流体的物理性质;
- (2) 储层岩石的物理性质;
- (3) 饱和多相流体的油藏岩石的渗流特性;
- (4) 提高原油采收率的机理及应用。

2. 油层物理学与其它课程之间的关系

- (1) 先修课程包括数学、物理、化学、物理化学、石油地质学、化学原理等;
- (2) 后续课程包括渗流力学、油藏工程、钻井工程、采油工程、提高采收率原理、油藏数值模拟等。

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,通过获取油藏流体、岩石样本,研究油藏流体的高压物性,判断油藏的类型,研究岩石的性质等,为制定油气田开发方案提供基础数据;在开发中后期,通过岩心驱替研究等,为油气藏提高采收率提供理论与技术支持。

油层物理学是建立在基础课程上的一门重要的专业基础课,学习本课程的目的是使学生掌握油藏流体和岩石高压物性的基本知识、基本概念和相关的实验测试手段,为后续专业课程的学习打下坚实的基础。本书也可从事油藏流体和岩石高压物性研究、提高采收率技术研究的石油工作者提供重要的参考。

三、油层物理学的发展概况

油层物理学是一门年青的学科。最早从事油层物理方面研究的是 G. H. Fancher 等人(20 世纪 30 年代),他们主要研究地下流体性质。1949 年, M. Musket(美国)出版了《采油物理原理》^[4]一书,把过去关于油层岩石和流体性质方面的概念及研究成果系统化和理论化,使油层岩石及流体物性与各种类型油气田开发密切地结合在一起。1956 年,俄罗斯学者 Ф. И. 卡佳霍夫所著的《油层物理基础》,把油层岩石及流体性质等从采油工程中独立出来,形成一门新的学科。

20 世纪 50 年代,我国第一所石油院校——北京石油学院(1953 年成立)——聘请前苏联专家吉玛都金诺夫首次开设了“油层物理”课程。在此基础上,20 世纪 60 年代末华东石油学院洪世铎老师编写了《油层物理基础》一书(校内印刷),该书成为国内第一本油层物理教材,1985 年由石油工业出版社正式出版。经过十几年的教学与科研积累,结合国内外资料调研,石油大学(华东)油层物理课题组于 1998 年编写了《油层物理学》(校内印刷),2001 年由石油大学出版社正式出版;2003 年,第 2 次修订出版;同年又编写了《油层物理(双语)》教材(校内印刷),于 2006 年修订成与汉语版对照的《油层物理学》双语教

材,并由中国石油大学出版社正式出版。

教学科研资料多年的积累及国内外研究成果与教材内容的借鉴,使油层物理的研究内容不断丰富、充实,将油层物理、油气渗流机理方面的研究带入了新的境界,并使油层物理学的应用进入更广阔和更深入的层次。

四、学习本课程的目的、任务和方法

1. 学习本课程的目的

学习本课程可以使学生牢固掌握储层流体性质、储层岩石性质及油藏岩石渗流机理的基本概念、基本理论、基本研究方法和应用。

2. 学习本课程的任务

- (1) 系统学习油层物理学的基本理论;
- (2) 系统学习油层物理学的基本研究方法和应用;
- (3) 培养学生严谨的科学作风和实事求是的科学态度。

3. 学习本课程的方法——理论联系实际

通过理论知识的学习,扩展学生对油层物理研究方法的认识;通过实验环节,强化学生对油层物理理论的理解。因此,学习时不仅要掌握基本概念和基本理论,而且要培养实验和编程计算的技能,从而实现本课程的教学目标。

第一章 储层流体的物理性质

油气储层是指能够储集油气并能让油气在其中流动的多孔介质。油气储层简称储层,包括储集油气的岩石及其中的流体。油气储层上部有渗透性很差的致密盖层,对油气起保护作用。油气藏是指深埋在地下的油气聚集场所。一个油藏具有单一的构造圈闭、统一的水动力系统和油水界面。油田是指一个地区地下所有的油藏。储层流体是指储存于岩石孔隙中的石油、天然气和地层水。

石油和天然气是多组分烃类物质的混合物。由于油气储层深埋于地下,储层流体处于高温、高压状态,特别是原油中溶有大量天然气。因此,地下储层流体的物理性质与在地面有极大的差异。随着油气藏的开采,其中流体的相态也会发生变化(如由液相变成气液两相),影响油气藏的最终开发效果。油、气组成是影响其高压物性及相态特征的内因,温度和压力是外因。

本章主要介绍由温度、压力变化引起的油气藏烃类体系相态变化的规律及研究方法,储层流体(石油、天然气和水)的高压物性及其变化规律,烃类物质的溶解与分离的本质特征及计算方法;讨论地层流体高压物性的实验测定方法及经验确定方法等。

第一节 储层烃类的组成及分类

石油、天然气是由分子结构相似的碳氢化合物的混合物和少量非碳氢化合物的混合物组成的,统称为储层烃类。在标准状态下,储层烃类以气、液、固三种物质状态存在;但在油藏状态下,储层烃类物质通常以单一液态、气态或气液两相状态存在,很少以固态存在。由于储层烃类的组成及温度、压力的差异,不同储层以及同一储层不同位置的烃类的相态也不同。

1 石油的化学组成及分类

1.1 石油的化学组成

储层烃类主要由烷烃、环烷烃和芳香烃等构成,其中烷烃含量最多。烷烃又称为石

蜡族烃,其化学通式为 C_nH_{2n+2} 。表 1-1-1 是常温常压(20 ℃,0.1 MPa)下烷烃物质的相态与碳原子数的关系。

非烃物质(指烃类的氧、硫、氮化合物)在储层烃类中所占份额较少(氧、硫、氮元素含量不超过 1%~5%),但它们的一些独特性质对烃类的许多性质(如颜色、相对密度、粘度和界面张力等)都有影响,表 1-1-2 是常见非烃化合物的特点^[5]。

表 1-1-1 碳原子数与烷烃相态(常温常压)

碳原子数	1~4	5~16	>16
烷烃相态	气态(天然气的主要成分)	液态(石油的主要成分)	固态(石蜡的主要成分)

表 1-1-2 非烃化合物特点

化合物	主要成分	备 注
含氧化合物	苯酚、脂肪酸等	极性物质
含硫化合物	硫醇、硫醚、噻吩等	
含氮化合物	吡咯、吡啶、喹啉、吲哚	
高分子杂环化合物	胶质、沥青质	表面活性

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%,即使含硫量较高的原油(孤岛和江汉原油)与世界各地的含硫原油相比也不算很高,但我国原油的含氮量偏高,如表 1-1-3 所示。

表 1-1-3 原油中的硫、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	1.80~2.00	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

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

1.2 原油的视相对分子质量及非烃含量

1) 原油的视相对分子质量

原油主要是各种烃类物质的混合物。将 1 mol 原油的质量定义为原油的视相对分子质量(或摩尔质量),其计算式为:

$$M_0 = \sum y_i M_i \quad (1-1-1)$$

式中 y_i ——组分 i 的摩尔分数;

M_i ——组分 i 的摩尔质量。

一般将油气分成 $C_1 \sim C_6$ 的组分, C_7 以上的组分合在一起用 C_{7+} 表示。不同的油气藏 C_{7+} 组分的性质不同,一般通过组分分析给出 C_{7+} 的相对分子质量和相对密度。

原油中最小的分子是相对分子质量为 16 的甲烷,最大的分子是沥青质,其相对分子质量可达几千。因此,原油的视相对分子质量变化范围很大,一般为几十~几百。

2) 含蜡量

含蜡量指蜡在石油中所占的质量分数^[6]。蜡是一种白色或淡黄色的固体,主要由 C_{16} 以上的烷烃组成,熔点为 $37 \sim 90^\circ\text{C}$ 。蜡在地下以胶体状溶于石油中,当温度和压力降低时,可以从油中析出。原油从地层流向地面的过程中,温度不断降低,蜡析出的温度称为析蜡温度。因此,原油中蜡含量越高,析蜡温度越高。

3) 胶质含量

胶质是指原油中相对分子质量较大(约 $300 \sim 1\,000$)且含有氧、硫、氮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^[6]。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分数,一般在 $5\% \sim 20\%$ 之间。

4) 沥青质含量

沥青质是一种高相对分子质量(1 000 以上)、具有多环结构、呈黑色固态的非纯烃类化合物^[6]。

沥青质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,原油质量变差。

从胶质到沥青质是渐变的过程,是以相对分子质量的大小(胶质 $1\,300 \sim 1\,800$, 沥青质比胶质大)来划分的。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固体;② 胶质可溶于低分子烷烃,沥青质则不溶。

5) 含硫量

含硫量是指原油中所含硫(硫化物或单质硫)的质量分数。原油中含硫量较小,一般小于 1% ,但其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。

1.3 石油的商品性质及物理性质

1.3.1 石油的商品性质

石油的化学组成决定石油的商品性质。石油的商品性质通常由相对密度、粘度、凝

固点、含蜡量、胶质含量、沥青质含量、含硫量及馏分组成(某一温度下从原油中蒸馏出的成分所占的质量分数)等指标构成。表 1-1-4 和表 1-1-5 是我国部分油田和世界部分油田地面原油的性质^[5]。

表 1-1-4 我国部分油田地面原油性质

性 质 原 油	相对密度 d_4^{20}	运动粘度 $/(cm^2 \cdot s^{-1})$		凝固点 $/^{\circ}C$	含蜡 $\%$	胶质 $\%$	沥青质 $\%$	含硫 $\%$	残碳 $\%$	初馏点 $/^{\circ}C$	馏分组成/ $\%$ (质量分数)	
		50 $^{\circ}C$	70 $^{\circ}C$								<200 $^{\circ}C$	<300 $^{\circ}C$
大庆油田 S 区 P ₃ 层	0.875 3	17.40	—	24	28.6	13.3	—	0.15	2.5	88	14	28
胜利油田 T 区 S ₂ 层	0.884 5	37.69	17.95	33	17.9	18.3	3.1	0.47	5.5	79.5	9	20
孤岛油田 G 层	0.954 7	427.5	157.5	-12	0	27.5	6.6	2.25	8.95	15.8	1.9	11.2
大港油田 M 层	0.917 4	51.97	25.55	-12	6.17	13.98	6.27	0.13	4.81	97	4.0	20.5
克拉玛依油田	0.869 9	19.23	—	-50	2.04	12.6	0.01	0.13	3.7	58	18	35
玉门油田 L 层	0.853 0	12.9	—	-15.5	8.3	22.6	—	—	—	—	—	—
江汉油田 W 区 C ₃ 层	0.974 4	—	62.2*	21	3.8	51	9.6	11.8	9.5	89	5	21.8
辽河油田 C 区 S ₁ 层	0.903 7	37.4	—	-7	4.73	17.6	0.15	0.26	6.4	—	—	—
川中油田	0.839 4	12.3	—	30	18.1	3.4	—	—	—	—	—	—
任丘油田 P ₂ 层	0.889 3	63.5	—	33	22.6	20.7	—	2.35	—	14.8	—	—

注:① * 表示 100 $^{\circ}C$ 下的值;② 初馏点为原油蒸馏时塔顶出现第一批液滴的温度;③ 为了便于原油性质的对比,通常测定标准大气压力、50 $^{\circ}C$ 下的原油粘度。

表 1-1-5 世界部分油田地面原油性质

性 质 原 油	相对密度 d_4^{20}	运动粘度 $/(cm^2 \cdot s^{-1})$	凝固点 $/^{\circ}C$	含蜡量 $\%$	胶质 $\%$	沥青质 $\%$	含硫量 $\%$	残碳 $\%$
哈西-迈乌得油田 (阿尔及利亚)	0.804	2.76(20 $^{\circ}C$)	-45.56	2.40	0	0.06	0.13	0.83
基尔库克油田(伊拉克)	0.844	4.61(20 $^{\circ}C$)	-36	3.9	—	1.5	1.95	3.8
欣塔油田(印尼)	0.855	23.7(50 $^{\circ}C$)	43.3	29.3	—	19.5	0.08	—
玻牟油田(尼日利亚)	0.78~0.95	4.4(37.7 $^{\circ}C$)	17.78	5.1	—	—	0.16	—
阿加贾里油田(伊朗)	0.852	6.56(21 $^{\circ}C$)	—	中等	—	0.60	1.42	—
帕那油田(加拿大)	0.838 8	—	10.0	—	—	—	0.29	1.76
东得克萨斯油田(美国)	0.827~0.835	3.4(15.6 $^{\circ}C$)	—	—	—	—	0.21	—
罗马什金诺油田 II ₁ 层 (苏联)	0.868	7.3(50 $^{\circ}C$)	-38.89	4.3	—	—	1.61	—

由表 1-1-4 和表 1-1-5 可判断各油田原油商品性质的优劣。从表中可以看出,我国大

多数原油相对密度在 0.86 以上。美国《油气杂志》1976—1978 年刊登的“世界石油指南”102 个油田原油相对密度数据中,有 44 个油田原油相对密度大于 0.86。从相对密度来看,我国的原油大多属于较重的原油,克拉玛依油田原油的商品性质较优。

1.3.2 原油的物理性质

原油物理性质主要介绍脱气原油相对密度、颜色、凝固点、闪点、荧光性、旋光性等^[6]。

(1) 脱气原油的相对密度 γ_o (或 d_4^{20}): 指在标准大气压(0.101 325 MPa)、20 °C 条件下脱气油的密度与标准大气压、4 °C 条件下水的密度的比值。

$$\gamma_o = \frac{\rho_{os}}{\rho_{ws}}$$

式中 γ_o ——地面脱气原油的相对密度;

ρ_{os} ——地面脱气油的密度, g/cm³;

ρ_{ws} ——4 °C 下地面纯水的密度,一般取 1 g/cm³。

欧美国家通常以 API 重度(America Petroleum Institute——美国石油协会)表示相对密度,单位为°API,它与相对密度的关系为^[7]:

$$API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5$$

式中 γ_o ——脱气原油相对密度,即大气压力、60 °F(15.6 °C)下脱气原油的密度与 4 °C 下纯水的密度之比。

根据上式,水的相对密度为 1,API 重度为 10 °API;而原油的 API 重度一般为 10~60 °API,油越轻,API 重度越大。

(2) 原油的颜色:一般呈棕褐色、黑褐色、黑绿色,也有黄色、棕黄色和浅红色。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深。因此,原油的颜色深浅大致能反映原油中重组分含量的多少。

(3) 原油的凝固点:指原油冷却过程中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、胶质、沥青质含量及轻质组分含量等有关,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 °C 之间。凝固点高于 40 °C 的原油称为高凝油。一般含蜡量高的原油的粘度对温度比较敏感,即随温度升高,粘度降低较快;胶质、沥青质含量高的原油,凝固点低,粘度随温度的升高降低较缓慢。

(4) 闪点:又称闪火点,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 101.33 kPa 下的数值表示。原油闪点一般在 30~180 °C 之间。

(5) 荧光性:原油在紫外光照射下发出一种特殊光亮的特征。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。原油密度的不同使荧光颜色有明显的差异(见表 1-1-6)。

(6) 旋光性: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。偏光面旋转的角度称为旋光角。原油的旋光角一般小于 1° ,极个别的可以大于 1° 。

(7) 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(1.000 6)相近。

表 1-1-6 不同密度原油的荧光特色

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	荧光颜色
$>0.965\ 9$	棕色
$0.904\ 2 \sim 0.965\ 9$	橘红色
$0.849\ 8 \sim 0.904\ 2$	黄色—乳白色
$0.825\ 1 \sim 0.849\ 8$	白色
$<0.825\ 1$	白色—紫色

1.4 原油的分类

国际石油市场评价原油商品性质的主要指标有含硫量、含蜡量、胶质沥青质含量及馏分组成等。由于环境保护越来越受世界各国重视,含硫量指标直接影响原油的销售价格。含蜡量、胶质沥青质含量对原油的凝固点、流动性都有显著影响。按照石油的商品性质、石油的关键组分、相对密度、粘度等,可以将石油分为不同的类型。

1.4.1 根据原油的商品性质分类

根据原油的商品性质,有以下三种分类方法,如表 1-1-7 所示。

(1) 根据原油中硫(硫化物或单质硫)的含量可把原油分为:低硫原油、含硫原油、高硫原油。

含硫原油具有不好的气味,而且对炼油不利,燃烧生成的二氧化硫会污染环境。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属于少硫原油。

(2) 根据原油中胶质沥青质的含量可将原油分为:少胶原油、胶质原油、多胶原油。

胶质沥青质在原油中会形成胶体结构,对原油的流动性及其它许多性质具有很大的影响。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、含蜡原油、高含蜡原油。

原油中的含蜡量常常影响其凝固点,含蜡量越高其凝固点越高,这给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。

表 1-1-7 原油按商品性质分类表

分类依据	含 硫			含胶质沥青质			含 蜡		
含量/%	<0.5	0.5~2.0	>2.0	<8	8~25	>25	<1	1~2	>2
类 型	低硫原油	含硫原油	高硫原油	少胶原油	胶质原油	多胶原油	少蜡原油	含蜡原油	高含蜡原油

1.4.2 根据地面脱气原油相对密度分类

随着分子中碳原子数目的增加,烃类物质的相对密度也增加。按照地面油相对密度可将油藏分为凝析油藏、挥发油藏、常规油藏和稠油油藏,如表 1-1-8 所示。我国大多数油藏属于常规油藏。

表 1-1-8 油藏分类表

相对密度	0.60~0.70	0.71~0.80	0.81~0.92	>0.92
油藏类型	凝析油藏	高收缩油油藏(或称近临界油藏、挥发油藏)	常规油藏	稠油油藏

表 1-1-8 中,凝析油藏是指流体在地层条件下为气相烃类,流到地面分离器后凝析出的液态烃(轻质油),一般相对密度小于 0.82。临界油藏指流体在地层条件下呈液态,相图上油藏的原始温度、压力条件接近临界点,在开发过程中挥发性强,收缩率高,气油比一般在 $210 \sim 1\,200 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间,一般相对密度小于 0.825,体积系数大于 1.75。

1.4.3 根据地层原油的粘度分类

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。按地层条件下原油的粘度可将原油分为^[6]:

低粘原油——地层条件下原油粘度低于 $5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;

中粘原油——地层条件下原油粘度为 $5 \sim 20 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;

高粘油——地层条件下原油粘度为 $20 \sim 50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;

稠油——地层条件下原油粘度高于 $50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,相对密度大于 0.920。稠油又分为三大类四级,如表 1-1-9 所示。

表 1-1-9 稠油分类方法^[8]

稠油分类		主要指标		辅助指标	开采方式
类 别	级 别	粘度/(mPa·s)	相对密度(20℃)		
普通稠油	I	I—1	50~150*	>0.92	注水或热采
		I—2	>150*~10 000	>0.92	热 采
特稠油	II	>10 000~50 000	>0.95		热 采
超稠油	III	>50 000	>0.98		热 采

注: * 指地层条件下原油粘度,无 * 则指油层温度下脱气油的粘度。