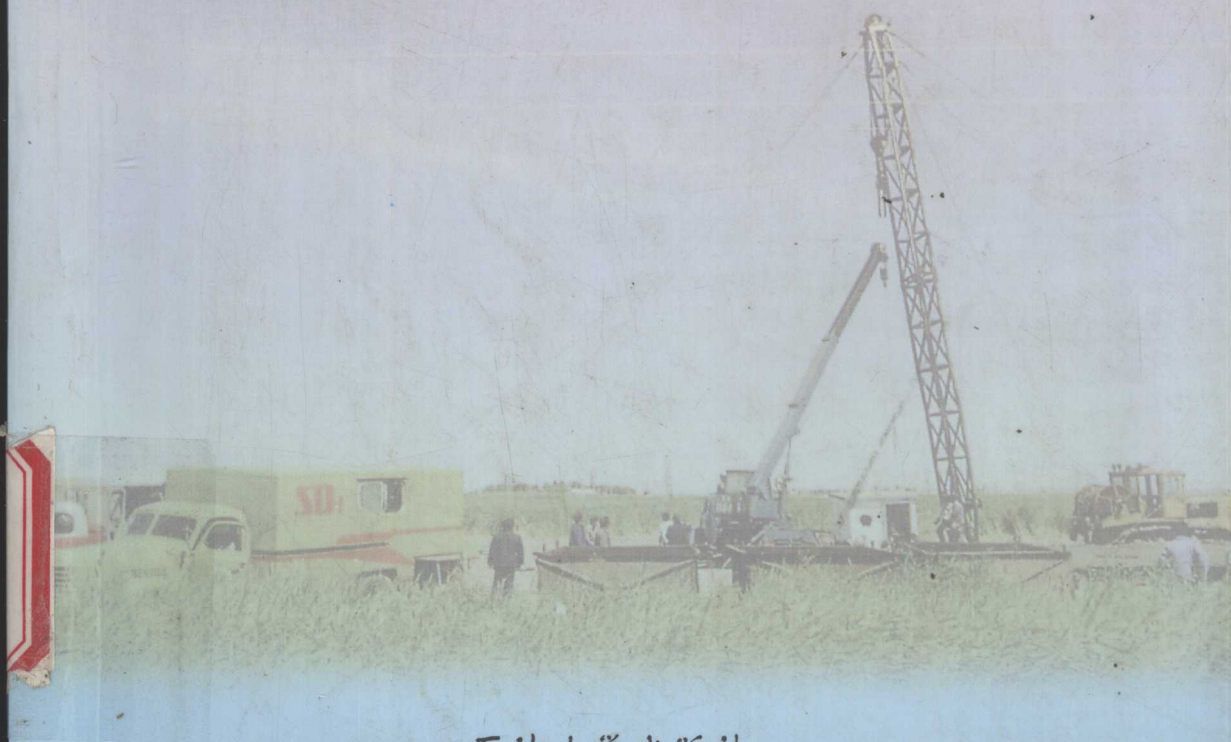




石油高等学校教材

油层物理学

主编 秦积舜 李爱芬



石油大学出版社

油层物理学

主编 秦积舜 李爱芬
编者 孙仁远 孟红霞 张志英

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油层物理学/秦积舜,李爱芬主编. —东营:石油大学出版社,2003.9

ISBN 7-5636-1501-6

I. 油... II. ①秦...②李... III. 储油层-物理性质-研究 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 038149 号

油层物理学

主编 秦积舜 李爱芬

责任编辑: 郜云飞(电话 0546-8391935)

封面设计: 傅荣治(电话 0546-8391805)

出版者: 石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn~upcpress>

电子信箱: sanbians@mail.hdpu.edu.cn

印刷者: 泰安开发区成大印刷厂

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本: 787×960 1/16 印张:22 字数:420千字

版 次: 2001年8月第1版第1次印刷 2004年6月第2版第3次印刷

印 数: 4001~6000册

定 价: 26.00元

前 言

Foreword

《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编写的。本书可作为石油地质、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、水的化学组成的基础上,重点讨论油、气相态及其表示方法,以及油、气、水高压物性参数的定义、特征、求取原理与计算方法等。

第二章:储层岩石的物理性质 主要介绍储层岩石的骨架特征,孔、渗、饱特征和胶结物性质等的描述方法,储层岩石常规物性的测定原理与方法,通过分析经典渗流模型介绍储层岩石的研究进展。

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试验研究方法及其在油田开发中的应用。

第四章:油层物理研究与应用 通过介绍采收率及其影响因素、剩余油研究方法、物理模拟原理与提高采收率实验方法等,讨论油层物理在提高采收率中的应用及其研究方法。

在本书的编写和修订过程中,我们充分考虑了本书与前修和后续课程内容的衔接及与相关专业课内容的交叉和互补;收集和参考了大量的国内外文献,汇集了本学科近 10 年的新技术和新成果,突出系统性和实用性、新颖性。在系统性上注重各章节的体系特点和内容连贯;在实用性上突出基本概念、基本理论的分析,并扩充对实用经验公式和实验方法的介绍;而新颖性则以介绍提高采收率新技术为主,讨论了油田开发中、后期需要解决的一些技术问题。

本书是在 2001 年 8 月第 1 版的基础上修订和改编的。绪论、第一章由李爱芬修订和改编,第二章由孙仁远修订和改编,第三章由孟红霞修订和改编,第四章由张志英修订和改编;书中英文名词由张志英统一配译。全书最后由秦积舜统稿。

尽管我们在修订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

2003 年 6 月

目 录

Contents

绪论	(1)
第一章 储层流体的物理性质	(4)
第一节 储层烃类系统的相态	(4)
第二节 油气体系中的气-液分离与溶解	(19)
第三节 天然气的高压物性	(36)
第四节 地层原油的高压物性	(66)
第五节 地层水的高压物性	(80)
习 题	(87)
思考题	(93)
第二章 储层岩石的物理性质	(94)
第一节 砂岩的骨架性质	(94)
第二节 储层岩石的孔隙性	(102)
第三节 储层岩石的渗透性	(123)
第四节 储层流体饱和度	(144)
第五节 岩石的胶结物及胶结类型	(158)
第六节 毛细管渗流模型及其应用	(178)
第七节 储层岩石的其他物理性质	(182)
习 题	(187)
思考题	(189)
第三章 饱和多相流体的油藏岩石的渗流特性	(190)
第一节 油藏流体的界面张力	(190)
第二节 油藏岩石的润湿性和油水分布	(199)
第三节 油藏岩石的毛管力	(211)
第四节 饱和多相流体岩石的渗流特征	(238)

第五节 微观渗流机理.....	(255)
习 题.....	(259)
思考题.....	(264)
第四章 油层物理研究与应用.....	(265)
第一节 采收率及其影响因素.....	(265)
第二节 提高原油采收率简介.....	(274)
第三节 剩余油饱和度与采收率.....	(297)
第四节 物理模拟原理.....	(310)
思考题.....	(330)
附录.....	(331)
附录 A 离心排驱压力 p_{cl} 公式的推导	(331)
附录 B 不稳定法测相对渗透率公式的推导	(334)
附录 C 公式(3.5.3)的推导	(337)
附录 D 公式(3.5.5)的推导	(339)
附录 E π 定理的证明	(340)
参考文献.....	(343)

绪 论

1. 绪论 2. 石油地质学的发展 3. 石油地质学在国民经济中的地位 4. 石油地质学的主要任务 5. 石油地质学的主要分支学科 6. 石油地质学的主要研究方法 7. 石油地质学的主要研究成果 8. 石油地质学的主要应用 9. 石油地质学的主要展望 10. 石油地质学的主要参考文献

一、油气资源现状及其地位

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,它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。

据 2002 年统计数据表明,我国的油气产量已超过 1.6 亿吨。油气资源在整个能源结构中所占的比例约为 1/5。我国现有油气生产能力和经济发展规模是不相称的。从世界石油工业的发展趋势看,我国不仅要加快勘探开发石油资源的力度,而且要大力发展提高油气采收率技术。

和煤炭资源一样,石油和天然气是不可再生资源,因此要合理地开发、利用和保护石油与天然气资源。表 1 为我国截至 2000 年已发现的石油资源分类。表中资料说明:我国石油与天然气资源有限;在这些有限的资源中,还有相当大的部分等待用高新技术去开发。

表 1 我国石油资源分类(截至 2000 年)

类 型		比例/%	数量/(亿吨)	说 明
可动油	经济采出	20.60	25.4	现有技术经济条件能够采出
	经济剩余	12.90	15.9	
	最大剩余	18.60	23	现有新技术经济条件能够采出
	未波及	8.40	10.4	
不可动油	波及	27.40	33.8	21 世纪的新技术能够采出一部分
	未波及	12.10	14.9	

从世界各国发展的经验分析,寻找油气资源、增加油气产量主要有两个途径:一是加大勘探力度,寻找新的油气田,增加油气后备储量;二是发展开采技术,提高现有油气田的采收率,增加油气产量。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、开发技术和知识。

二、油层物理学研究内容及其与其他课程之间的关系

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。

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) 油层物理研究方法与应用。

2. 油层物理学与其他课程之间的关系

- (1) 先修课程包括数学、物理、化学、物理化学、地质学、热力学等;
- (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。

油层物理学是石油工程专业的专业基础课,它为专业课服务,也是它们的理论基础之一。

三、油层物理学的发展概况

俄罗斯学者 $\Phi \cdot \text{И} \cdot$ 卡佳霍夫于 1956 年撰著的《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,组成一门新的学科。

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。20 世纪 40 年代 M. Musket(美国)出版《采油物理原理》一书,把过去关于油层岩石和流体性质方面的概念与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。20 世纪 60 年代 James, W. Amyx 等人从油气田勘探开发角度系统概括了油层物理科学理论,使油层物理学研究进入一个新的阶段,代表作有《油藏工程》。在这以后的 20 多年里, A. БAH 等人于 1962 年撰著的《岩石性质对地下流体渗流的影响》, R. E. Collins 于 1961 年发表的《流体通过多孔材料的流动》, F. A. L. Dullien 于 1978 年出版的《多孔介质-流体渗移与孔隙结构》及其他数十名学者发表的数百篇论文和相关研究成果,将油藏岩石渗流机理方面的研究带入了新的境

界。

И·И·马尔哈辛撰著的《油层物理化学机理》、van Poolen 等人于 1980 年撰著的《提高采收率原理》、郭尚平等人于 1990 年撰著的《物理化学渗流微观机理》和沈平平于 2001 年出版的《油水在多孔介质中的运动理论和实践》等,系统讨论了提高原油采收率过程中的地层原油渗流的物理化学过程,揭示了提高原油采收率与油层物理研究的关系,使油层物理学的研究和应用进入更广阔的领域和更深入的层次。

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地掌握储层岩石性质、储层流体性质及油藏岩石渗流机理的基本概念、基本理论、基本研究方法和基本应用方法。

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方法;
- (3) 培养学生严格的科学作风、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,学生在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

油气藏是由油气储层、隔层、夹层及盖层等以特定层序组合构成的。油气储层简称储层。**储层**包括储集油气的岩石以及其中的流体。**储层流体**是指储存于岩石孔隙中的石油、天然气和水。

石油和天然气是多组分烃类物质的混合物。储层深埋于地下,储层流体处于高温、高压状态,特别是原油中含有大量的天然气。因此,地下储层流体的物理性质与其在地面时相比有极大的差异。油、气组成是影响其高压物性特征的内因;温度、压力是外因。

本章主要介绍储层流体——石油、天然气和水的基本性质,讨论由于温度、压力变化引起的油气藏烃类体系相态变化的规律以及烃类物质的溶解与分离的本质特征等。

第一节 储层烃类系统的相态

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,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;在油藏状态下,储层烃类物质通常以单一液相或气-液两相存在,很少以固态存在。由于储层烃类的组成及所处温度、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 储层烃类的化学组成、石油的商品性质及分类

1.1 储层烃类的化学组成

储层烃类主要由**烷烃**、**环烷烃**和**芳香烃**等构成。其中烷烃含量最大。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、常压下烷烃的相态与碳原子数的关系。

非烃物质在储层烃类中所占份额较小,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)都有一定的影响,表 1.1.2 是常见非烃化合物的特点。

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

1.2 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、沥青质含量、含硫量及馏分组成指标等构成。表 1.1.3 和表 1.1.4 分别是我国部分油田和世界部分油田地面原油的性质。

表 1.1.3 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/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)		凝固点 / $^{\circ}\text{C}$	含蜡 / %	胶质 / %	沥青质 / %	含硫 / %	残碳 / %	馏分组成(质量分数)/ %		
		50 $^{\circ}\text{C}$	70 $^{\circ}\text{C}$							初馏点	< 200 $^{\circ}\text{C}$	< 300 $^{\circ}\text{C}$
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: * 表示 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下的值。

表 1.1.3 中 D_4^{20} 的含义是在标准大气压(1 atm, $1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)、20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下油的密度与标准大气压、4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下水的密度的比值。

为了便于原油性质的对比,通常测定标准大气压、50 $^{\circ}\text{C}$ 的原油粘度。从表

1.1.3 和表 1.1.4 可判断各油田原油商品性质的优劣。以表 1.1.3 数据为例, 克拉玛依油田原油的商品性质较优。

表 1.1.4 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 $/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	凝固点 $/^\circ\text{C}$	含蜡 $\%$	胶质 $\%$	沥青质 $\%$	含硫 $\%$	残碳 $\%$
哈西-迈乌得油田 (阿尔及利亚)	0.804	2.76(20 $^\circ\text{C}$)	45.56	2.40	0	0.03	0.13	0.83
基尔库克油田(伊拉克)	0.844	4.61(20 $^\circ\text{C}$)	-36	3.9	—	1.5	1.95	3.8
欣塔油田(印尼)	0.855	23.7(50 $^\circ\text{C}$)	43.3	29.3	—	19.5	0.08	—
阿加贾里油田(伊朗)	0.852	6.56(21 $^\circ\text{C}$)	—	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)	0.831 5	4.10	—	—	—	—	—	—
罗马什金诺油田 II ₁ 层 (前苏联)	0.868	7.3(50 $^\circ\text{C}$)	-28.89	4.3	—	—	1.61	—

1.3 石油的分类

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、含胶质沥青质及馏分组成等。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、含胶质沥青质质量对原油的凝固点、流动性都有显著影响, 给原油的开采和集输技术提出更高的要求。根据原油的商品性质不同, 原油分类见表 1.1.5。

表 1.1.5 原油分类表

分类 依据	含 硫		含胶质-沥青质			含 蜡		
含量 $\%$	<0.5	>0.5	<8	8~25	>25	<1	1~2	>2
类型	少硫原油	含硫原油	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

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。通常按地面油相对密度对油藏进行分类, 按天然气相对密度对气藏进行分类。表 1.1.6 和表 1.1.7 分别是油藏分类表和气藏分类表。

表 1.1.6 油藏分类表

烃类物质相对密度	0.60~0.70	0.71~0.80	0.81~0.94	>0.94
油藏类型	凝析油藏	临界油藏	常规油藏	稠油油藏

表 1.1.7 气藏分类表

天然气相对密度	0.60~0.70	0.71~0.80	>0.80
气藏类型	干气气藏	凝析气藏	湿气气藏

2 储层烃类相态的研究方法

2.1 体系、相、组分和组成

✓ **体系**: 亦称系统, 是指由一定种类和质量的物质所组成的整体。整体是指物质本身与其周围是相分离的。

✓ **相**: 是指体系中具有相同成分、相同物理化学性质的均匀物质部分。相与相之间有明显的界面。一个相中可以含有多种组分。在一个体系中, 相态是可以相互转化的, 其转化条件是系统的压力、温度等。

✓ **组分**: 是指混合物体系中的各个成分, 如烃类体系中有甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、氮气等组分。

✓ **组成**: 是指体系中的各个成分或组分及其相对量, 常用百分数表示。

一个体系的相态特征不仅与其组成有关, 还与其所处的压力、温度等条件有关。

2.2 相图(phase diagram)

对于一个组成固定的体系, 其相态是压力(p)、温度(T)和比体积(v)的函数, 即:

$$F(p, T, v) = 0 \quad (1.1.1)$$

式(1.1.1)称为状态方程。将状态方程用图形表示就是相图。可以做出 p 、 T 、 v 三个变量的立体相图, 如图 1.1.1 所示。此类相图的制作和使用都不方便, 因此, 通常是固定一个变量, 制作双变量平面相图, 如描述体系相态与压力、温度关系的 $p-T$ 相图和描述体系相态与压力、比体积关系的 $p-v$ 相图等。由于油藏开发、开采过程中必须考虑压力、温度等条件变化对烃类相态的影响, 所以 $p-T$ 相图是油藏开发与开采中最常用的相图。

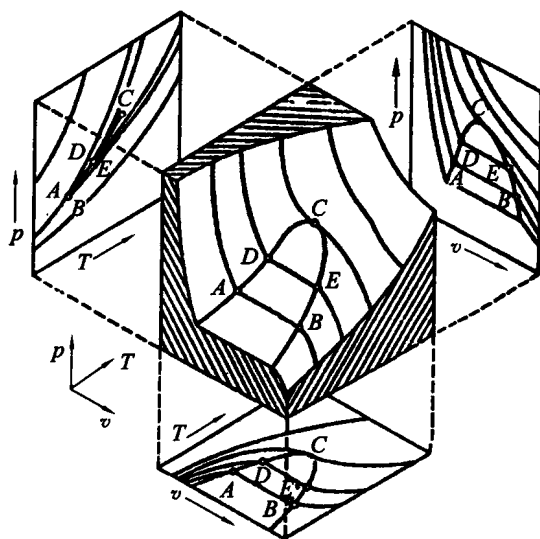


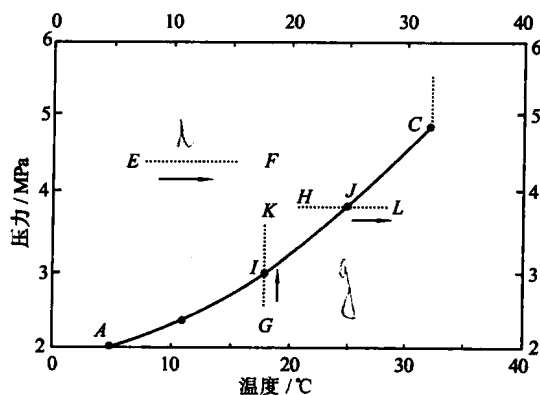
图 1.1.1 乙烷的立体相图(Zollan Gyalay, 1977)

3 单、双、多组分体系的相态特征

3.1 单组分体系的相态特征(phase behavior)

3.1.1 单组分体系的 $p-T$ 相图

单组分物质体系的相图即纯物质的饱和蒸气压曲线,如图 1.1.2 所示。图中单调曲线 AC 表达了乙烷气、液两相平衡的温度和压力条件,组成曲线 AC 的各点为不同温度下乙烷的饱和蒸气压。

图 1.1.2 乙烷的 $p-T$ 相图(Brown 等, 1948)

下面以图 1.1.2 为例分析乙烷的相态特征。

图中曲线 AC 的终点 C 称为临界点(critical point), 对应的温度和压力分别称为临界温度(T_c)和临界压力(p_c), 是体系中两相共存的最高压力点和最高温度点。

图中曲线 AC 左上方的区域是乙烷以液相形态存在的压力、温度区域; 同理, 曲线 AC 右下方为气相区域。

图中点 E 位于液相区, 压力不变, 温度升高至点 F, 点 F 在液态区, 乙烷仍为液相。

图中点 G 位于气相区, 温度不变, 压力升高至点 I, 点 I 在饱和蒸气压曲线上, 乙烷由气相变成气液两相。单组物质从气相变化到两相所经的点 I 称为露点。压力继续升高至点 K, 点 K 在液相区, 乙烷完全变成液相。线 GK 称为等温线。露点(dew point)是指温度(或压力)一定时, 开始从气相中凝结出第一批液滴时的压力(或温度)。

图中点 H 位于液相区, 压力不变, 温度升高至点 J, 点 J 在饱和蒸气压曲线上, 乙烷由液相变成气液两相。单组物质从液相变化到两相所经的点 J 称为泡点。泡点(bubble point)是指温度(或压力)一定时, 开始从液相中分离出第一批气泡时的压力(或温度)。温度继续升高至点 L, 点 L 在气相区, 乙烷完全变成气相。线 HL 称为等压线。

沿等温线或等压线逆行可得到相反的现象。

在等温线上, 压力等于或稍高于点 I 的饱和蒸气压时, 体系中便有液体凝析出来; 反之, 体系中便有气体分离出来。在等压线上, 温度等于或稍高于点 J 的温度时, 体系中便有气体分离出来; 反之, 体系中便有液体凝析出来。因此, 单组物质的饱和蒸气压曲线 AC 实际上是该物质的露点与泡点的共同轨迹线。

归纳起来, 单组分体系 $p-T$ 相图特征如下:

- (1) 单调曲线: 由单组物质的泡点和露点共同构成的轨迹线;
- (2) 三个区: 液相区, 气相区, 两相区(线);
- (3) 临界点: 单组物质体系的临界点, 是该体系两相共存的最高压力点和最高温度点。

图 1.1.3 是油气藏中常见的几种纯物质的蒸气压($p-T$)曲线。它们都是单调曲线。图中两条虚线之间的区域为正常的油气藏温度范围。由图可知, CO_2 、丙烷等的临界点落在两条虚线之间的区域中, N_2 和甲烷等远离虚线之间的区域, 这是混相驱提高采收率技术选择 CO_2 和丙烷等做混相剂的主要原因。

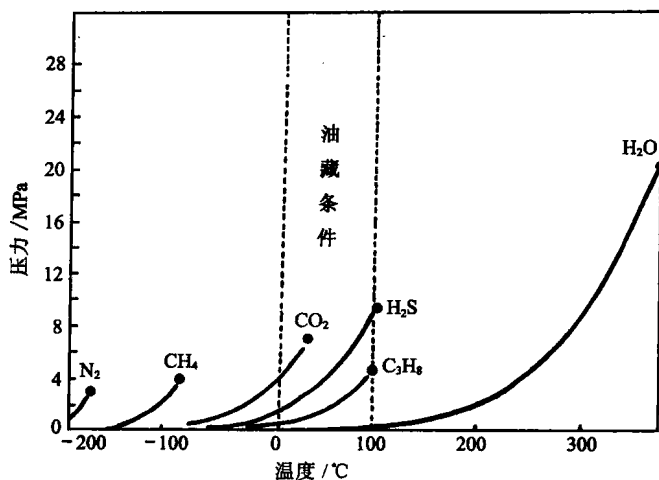
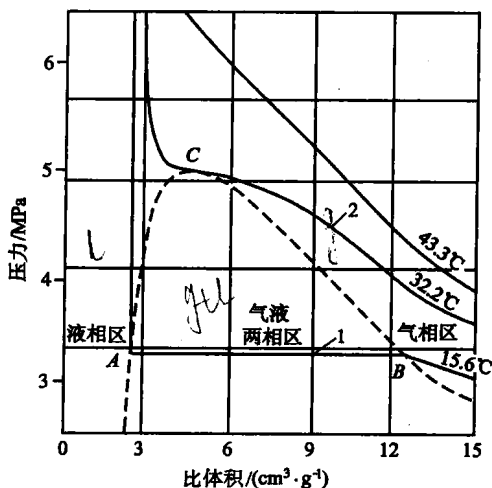


图 1.1.3 常见纯物质的蒸气压曲线

3.1.2 单组分体系的 $p-v$ 相图

图 1.1.4 是乙烷的 $p-v$ 关系曲线。

图 1.1.4 乙烷的 $p-v$ 曲线

图中线 1 表明:在 15.6°C 条件下,当体系压力较低时,随压力增加,乙烷体积明显缩小。压力升至点 B,体系中开始凝结液滴,定义点 B 为露点。在体系压力不变的条件下,乙烷气体沿线 BA 凝结为液体,在这个过程中乙烷体积迅速缩小。到点 A 时,气体完全凝结为液体。过点 A 后,随着压力继续增加,乙烷