

绪 论

一、油藏及开发地球化学的定义及研究范围

油藏及开发地球化学是应用传统的有机和无机地球化学与油藏工程、石油工程紧密结合起来,采用现代地球化学分析测试技术,并综合各种油田现场资料直接研究油藏流体的非均质性形成机制、分布规律及与油藏中有机与无机岩石矿物的作用,探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制,从而将其应用于增强勘探,尤其是在采油和开发的策略措施的一门新的分支学科。它是一门实验性、应用性很强的应用地球化学学科分支,由于其和生产实际应用的密切联系受到广大学者和现场工作者的重视,从而构成地球化学领域的一个新的学科生长点。

油藏及开发地球化学的研究领域很广,可以说凡是应用地球化学手段及方法,研究油藏勘探和石油开发的一切问题均属于油藏及开发地球化学研究的范畴。1995年9月中旬在西班牙巴斯克召开的第16届有机地球化学会议上,油藏及开发地球化学成为石油地球化学领域的主要研究方向,征文主要范围可以涵盖目前油藏及开发地球化学的主要研究领域。包括如下几个方面:

油水界面焦油(超重油)席的探测与解释(Detection and interpretation of tar mats);

单井技术(Single well techniques);

流体充注与油藏聚集史的确定与重建(Determination and reconstruction of filling histories);

油藏空间分隔性与渗透屏障的评价(Assessment of reservoir compartmentalisation and permeability barriers);

流体充注与混合时间规模的模拟(Modeling filling and mixing time scales);

⑥探测不同含油与含水区块的统计学方法(Statistical methods for detecting different petroleum or aqueous populations);

⑦采出流体的生产监测(Production monitoring of produced fluids);

⑧油藏演化中的生物降解作用、水洗、热演化和裂解作用(Biodegradation, water washing and secondary cracking in reservoir alteration);

⑨高温高压储层(High pressure high temperature reservoirs);

⑩油-水和油-矿物相互作用(Oil water and mineral interaction)。

Larter 和 Aplin (1995)总结了目前油藏及开发地球化学在油气田勘探开发中的主要应用领域,包括如下几个方面:

根据试井原油特征测定烃源岩类型和成熟度;

通过对油田充注点或运移路线的研究,来帮助确定新的卫星油田的位置和区域性运移路线;

盆地古水文学或原油蚀变控制因素的评定;

油气藏封闭性评定。在油藏评价和储层评价中的应用包括:流体界面的确定;油藏连通性确定;为投资和利用决策需要,评定油柱质量和历史; S_w (含水饱和度)的计算;

焦油席 (tar mat) 确定；

⑥与脱沥青有关的潜在开采问题的鉴别；

⑦石油-水-岩石相互作用及其对界面润湿性和石油粘度的影响；

⑧在油田开发和生产监测中的应用：屏障（边界）定位与输入采油生产模式；为评价采油生产计划所进行的生产监测；管道漏失评定——混合的采油生产问题；注水突进的评定；油藏酸化机理。

上述几个方面的研究方向是近期油藏和开发地球化学研究的几个热点问题。目前油藏及开发地球化学已被成功地应用于解决有关油气藏形成机理、油藏评价和开发的问题。其中最有成效的应用领域是：根据油藏内流体的非均质性特征研究储层流体的连通性，探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制、储层孔隙形成的有机-无机反应及孔隙分布预测；油藏及开发地球化学描述与油藏注入史研究；油田开发动态的地球化学监测；油-岩润湿性的地球化学机制及其应用。此外，目前地球化学方法在其他许多方面也得到了较好的应用效果，比如：混采油藏产层位置的确定，中途测试前原油物性的预测，生产层与非生产层的识别，油藏非烃和高分子量烃的表征和预测等。此外，油层中的包裹体残余盐类、原油中非烃成分的研究也可应用于解决油气运移、充注、聚集历史、成藏时间乃至油-水-岩相互作用及其对石油润湿性、粘滞性的影响等，进而向油藏工程学的渗透，为油田勘探开发提供新的依据。但笔者认为油藏和开发地球化学的领域并不仅仅限于此，相信随着今后研究工作的深入，其研究的领域会进一步拓宽。

二、油气勘探地球化学与油藏及开发地球化学的相似性与差异

长期以来，在石油工业中有机地球化学的主要目标是面向油气勘探而不断发展壮大起来，石油地球化学家的主要研究任务是鉴别与评价含油气盆地的主力烃源岩、进行油源对比、确定区域性的有机质成熟度和热演化史、计算生油量和盆地的资源量，为区域勘探决策提供依据。因而在 70 年代和 80 年代石油地球化学最为热门的话题是干酪根（Kerogen）学说和生物标志化合物（Biomarker）理论，而对油气藏形成规律与油气藏中流体特征虽有所涉及，如原油的运移和生物降解现象，但其它研究工作则相对较为薄弱，甚至是空白。

然而，随着石油勘探工作的不断深入，在进入区域勘探阶段和油田勘探（评价）阶段之后，特别是进入滚动勘探开发和油藏开发阶段，有机地球化学所发挥的作用，被认为是“似乎”非常有限的。80 年代中期以来，由于全球范围内未经石油勘探开发的沉积盆地日趋缩小，海洋与荒漠地区勘探费用日益高昂，加之世界石油市场油价下跌，导致国际石油勘探市场渐趋萎缩。在全球面临油价较低，经济形势不佳的情况下，国际上许多油公司纷纷减员，地球化学家和地球化学研究不断受到冲击。在面临着研究对象不断发生变化及油公司对地球化学学科要求能够为石油勘探和开发提供有效和实用的技术的情况下，地球化学的研究重点在最近十年转向直接面向勘探、开发问题了，特别是已参与和渗透到油藏的开发生产与监测管理等研究领域中来。油藏和开发地球化学应运而生。促进油藏及开发地球化学发展的驱动力始终是由于很多公司朝着更为专事采油生产企业方向发展的结果。世界石油工业面临着在勘探成熟盆地如何增储上产，确保下一世纪能源需求的问题。一些石油公司把重点从区域性油气勘探，转向专事油田开发生产，同时又面对现有油田（特别是中、老年期油田）怎样提高采收率的问题。在这个背景下，油藏开发地球化学大有用武之地。首先是西北欧的有机和无机地球化学家携手从北海的勘探与开发中存在的问题入手，以结合油田勘探寻找卫星油藏，服务于油田开发和开采为宗旨，率先开展地球化学油藏描述，研究油藏注入聚集成藏历

史，揭示油气混合成藏模式，以至进行油藏开采过程中的生产监测，改进采油工艺，提高油藏最终采收率。从而奠定了发展油藏及开发地球化学新学科的基础。

石油地球化学的研究重点从原来的勘探地球化学逐步转向为油藏及开发地球化学。并带来了几个新的地球化学研究思路的变化：首先是主要的研究对象从烃源岩转向以油藏为主体的烃源岩到储集岩的油藏体系；其次，从研究的学术领域来看已经不局限于有机地球化学问题，而是广泛地涉及到许多无机地球化学、油藏工程等多个学科的问题，并进一步促进了有机和无机地球化学的融合；带来的第三个变化是采用一系列原有的地球化学分析技术和指标体系去解决新的油藏工程问题。例如，开展油藏及开发地球化学描述，判断一口探井或一个探区油藏（特别是多薄油层油藏）的连通性；指示成藏过程中石油的充注点与运移方向，从而部署新探井等方面，均有取得良好效益的成功范例。因而从目前的研究来看，勘探地球化学和油藏及开发地球化学在应用的地球化学手段和方法上并没有较大的差异，不同点在于研究的对象和解决的问题发生了重大的变化。但相信今后在油藏和开发地球化学研究的方法和手段上会进一步得到发展。

三、国内外油藏及开发地球化学研究现状

80年代中期，国内外石油行业中兴起了油藏描述（Reservoir Characterization）与“储层地球化学”研究热潮，这两项研究的重心主要以强调储层物性空间变化规律为自己的研究目标。自1985年以来，石油地球化学家的研究焦点也日益明显地从勘探转向采油和与油藏有关的问题。然而，尽管当前油藏及开发地球化学研究已引起人们广泛的兴趣，但是在1985年以前几乎没有多少文献报导。Larter（1994）对1951—1991石油工程学会（SPE）全部出版物的计算机检索结果表明，有关油藏及开发地球化学公开发表的文献资料极为有限，且大多数论文均出现在1985年之后。我们以国际有机地球化学会议为例，统计油藏及开发地球化学论文数量的变化也同样可以反映出油藏及开发地球化学的发展历程（表1）。

表 1 国际有机地球化学会议油藏及开发地球化学方面的论文数统计表

日 期	会 议 名 称	论文总数	油藏及开发地球化学 论文数
1985.9.16~20	12 届国际有机地球化学会议	170	1
1987.9.21~25	13 届国际有机地球化学会议	222	2
1989.9.18~21	14 届国际有机地球化学会议	375	22
1991.9.16~21	15 届国际有机地球化学会议	277	25
1993.9.20~24	16 届国际有机地球化学会议	306	30
1995	17 届国际有机地球化学会议		34

1. 国外油藏及开发地球化学的发展沿革

虽然油藏及开发地球化学只有十多年的发展历史，但近年来已经取得了令人瞩目的进展。1984年Durand在一篇运移研究的综述性文章中提出了“油气藏有机地球化学”（Organic Geochemistry in Reservoir on Migration）。Dahl和Speer（1986）最早注意并检测到北海Odsberg油田石蜡基原油油藏的古、今油水界面处的焦油席，并探讨了其形成机理及其对注水采油的影响。

England等（1987）通过Fortiers油田的地球化学研究，首次将人们早已认识到的油藏

流体非均质性现象与成藏研究结合起来，首次提出了油藏充注与原油混合模式，并阐明了油藏及开发地球化学的概念，从而奠定了油藏及开发地球化学的理论基础。Leythaeuser 和 Ruckheim (1989) 最先报导了利用油藏石油组成的非均质性来探讨油气的聚集史。England (1990) 在有机地球化学 (Organic Geochemistry) 杂志中发表论文，正式地提出了油藏及开发地球化学的概念，并将有机地球化学、储层地质学和油藏工程有机地结合起来研究油藏，建立了油藏有机地球化学的基本理论。利用原油的气油比确定 Forties 油藏周缘可能的油气充注方向，并进一步论述了石油注入油藏后的混合作用机理。这篇论文的题目及关键词均使用了“油藏有机地球化学” (Organic Geochemistry of Petroleum Reservoir) 这一术语。

在上述油藏及开发地球化学的探索性研究进展的基础上，一个主要由英国纽卡斯尔大学和挪威奥斯陆大学的地球化学家和沉积学家等参与的国际合作研究项目，将油藏流体地球化学描述与成岩作用研究相结合，成功地剖析了北海 Ula 油田的油藏聚集史，将油藏及开发地球化学研究提高到一个新的水平 (Larter 等, 1991)。Larter 等 (1991) 成功地研究了北海乌拉油田的油藏聚集史。Horstad 等 (1989) 对北海油田研究确定五种主要的油藏充注成藏体系，并用于两口探井检验，其中之一已成功地测试出烃类。1992 年欧洲共同体为了欧洲特别是北海石油工业的长期发展，批准执行一项旨在发展油藏及开发地球化学前沿理论和技术的科学计划，由西欧的大学和科学家合作进行实施。其中石油的二次运移机理研究，储层非烃的分析化学与地球化学、流体-岩石相互作用等为其重要内容，为建立石油的二次运移理论模型，它们选择了西加拿大盆地为例，进行重点解剖，采用地质示踪剂技术研究石油运移的分馏效应，力求定量研究石油二次运移的方向、路径和体积，并进而建立预测模型，以指导外围盆地的勘探。这一导向性的研究计划大大促进了欧洲油藏有机地球化学的发展，并使西欧成为油藏及开发地球化学研究的重要地区。

与此同时，在油藏及开发地球化学描述技术 (方法) 方面也取得很大进展，由于油藏及开发地球化学直接研究流体分布，实际上推动了油藏描述表征技术的发展。如 Karlson 和 Larter (1989) 研究油藏内部石油组成类型的快速对比方法，将原来用作医用扫描的薄层色谱-火焰离子检测技术，应用于研究的快速扫描分析，结合其他分析技术，并应用于油藏描述。

Karlsen 和 Larter (1989), Bjørøy (1985, 1992, 1993) 把热蒸发 (即热脱附) 一气相色谱-火焰离子检测 (FID) 或质谱 (MS) 技术引进地球化学研究领域，为油藏及开发地球化学研究所需要的大量样品的扫描分析创造了条件。Kaufman 等 (1990) 利用原油中大量化合物的“气相色谱指纹”研究多薄层油藏中的连通性。Saigal 等 (1992) 将北海埃尔德非斯克油田岩心分析结果，结合重复地层测试 RFT 试井压力测试数据，研究油藏内部流体地球化学不连续性，判断油藏边界获得成功。

H.I. Halpern (1995) 介绍了一项应用轻烃星状图解进行油藏及开发地球化学研究的新方法。此外，Kharaka 等 (1988) 还将油藏中水-岩相互作用的理论模式和计算机模型应用于盆地的储层预测和采油过程的动态评价。

Smalley 等 (1992, 1995) 应用地层水中残余盐同位素分析进行油藏及开发地球化学描述。Philp 等 (1995) 发展了原油中 C_{40}^{+} 高分子量烃类检测技术，认为这些烃类易造成地下油层和地面管线的堵塞。这些研究成果表明，油藏及开发地球化学描述技术和成果向油田开发与开采领域的延伸。

Horstad 等 (1990) 使用原油中生物标志物成熟度参数在油藏平面上的变化规律判断

Gullfaks 油田的油气充注方向。Saigal 等 (1992) 将北海 Eldfisk 油田岩心分析结果, 结合重复地层测试资料研究油藏内部流体地球化学不连续性, 判断油藏边界获得成功。England 和 Mackenzie (1989), England 和 Mackenzie (1995) 用 GOR 值变化确定了 Fortier 油田的大致充注方向; Hillebrand 和 Leytheauser (1992) 应用原油组成非均质性研究了北海 Stockstadt 油田的多源供油和石油充注方向。

Wilhelems 和 Larter (1994) 通过研究发现焦油席的出现将有助于油藏质量, 在油田开采过程中可能发生脱沥青作用并在低渗透路处堵塞油层, 造成“死油”储量。

这些技术或方法都大大地促进了油藏及开发地球化学的发展。1993 年 1 月欧美油藏及开发地球化学专家在伦敦召开了首次油藏及开发地球化学的研讨会, 会后由 Cubitt 和 England 将会议交流论文编辑《油藏及开发地球化学》出版, 这是国际上这一领域的第一本论文集, 书中分“全面综述与新技术”和“实例研究”两个部分, 系统而详细地介绍了油藏及开发地球化学的涵义、方法、应用和机遇。石油大学 (北京) 的王铁冠教授等已将本书翻译出版。

2. 国内油藏及开发地球化学的发展沿革

从 1989 年以来, 国内翻译出版的油藏及开发地球化学方面的论文集主要有三本。梅博文教授主编的《储层地球化学译文集》, 它反映了油藏及开发地球化学发展的初始阶段国外学者的研究成果, 中心议题是储集岩成岩过程的有机-无机反应及其石油地质意义。林壬子教授主持编译的《油藏地球化学进展》, 基本上收集了国外 1993 年以前的油藏及开发地球化学研究论文, 代表了国际上油藏及开发地球化学的发展和研究现状。王铁冠教授翻译的《油藏及开发地球化学》(参见上文)

总体上来讲, 我国石油地球化学界开展有关油藏及开发地球化学的研究比较早, 早在“七五”中期, 梅博文、应凤祥、陈丽华等最先开展油田水有机酸分析, 研究“生油层—储层的有机-无机相互作用”对储层物性的影响。

1992 年洪志华等采用热解分析、荧光光谱、族组成、碳同位素、元素、红外光谱、气相色谱等常规地球化学分析技术, 对塔里木盆地东河 11 井石炭系储层原油进行地球化学研究, 在识别油层与认识其含油性方面取得进展。

1993 年王培荣主要采用 Rock-eval 岩石热解和薄层色谱—火焰离子检测技术, 对塔里木塔中 4 号构造的 3 口井石炭系油藏进行有机地球化学描述的初步尝试, 研究了三个油藏的油源与主要充注方向, 检测出 3 个“沥青质或稠油富集层”, 标志 3 个不同深度的古、今油水界面, 从而对油藏演化与保存史有所认识。

1994—1995 年王庭栋和廖永胜等引进全烃地球化学分析技术, 进行储层烃地球化学研究, 重点进行油源和油气运聚带的研究, 也有所成效。

1995 年, 张敏、梅博文等对塔里木盆地牙哈 2—3 构造作了油藏及开发地球化学描述, 并讨论了库车油气系统油气藏聚集史。1997 年张敏将该研究成果整理, 以专著出版, 专著的名称为《油藏地球化学——塔里木盆地库车含油气系统研究》。

1996 年廖永胜、王庭栋等以渤海湾盆地埕岛油田、曲堤地垒和四川盆地磨溪气田为例开展了“油藏及开发地球化学”专题研究。上述工作都是十分有益的尝试, 对国内油藏及开发地球化学描述和油藏及开发地球化学学科的发展起了促进作用。但是, 全面系统地开展以油藏描述和油藏聚集史等领域的油藏及开发地球化学研究, 如何更好地应用于石油的勘探、开发实践工作中, 取得实效, 还有待于今后广大地球化学家的共同努力。

四、油藏及开发地球化学与其他相关学科的关系

油藏及开发地球化学是一个新的交叉性的研究领域，和传统的无机地球化学、石油地质学、油藏工程、石油化学等学科均具有密切的联系。以下将简要讨论油藏及开发地球化学与其他一些学科的关系。

1. 无机地球化学

无机地球化学的研究重点则是与沉积学相结合，其焦点则总是瞄准油层质量，并且大部分无机地球化学研究只涉及岩石基质，这在描述和定量评价岩石性质方面发挥着重要的作用。但它忽略了油藏流体中包含的地质学和地球化学信息，从而忽略了对油气藏中流体的研究，这也就不可避免地限制了无机地球化学在油气田勘探、开发中的作用。随着国际石油工业向纵深发展，将无机地球化学和油藏地球化学结合起来，应用水化学分析研究油藏检测；应用流体包裹体技术和矿物相变研究油藏问题。使得无机地球化学和油藏地球化学的结合日益密切，并不断受到广大学者的重视。

2. 石油地质学

石油地质学是油藏地球化学研究的重要基础。油藏聚集史研究是石油地球化学面向解决石油地质问题的一个典型案例，同时也是该学科面向解决开发生产等实际问题的一个立足点和中心环节。通过对盆地（凹陷）油气的生排运聚过程定位到圈闭中油气的充注聚集和油气水的定位历史的研究上，有点有面，点面结合，深入理解和剖析油气的生成过程和油藏的形成模式，更好地为油气田勘探开发生产服务。

3. 沉积储层

沉积储层作为油藏流体的容器和通道，其质量的好坏直接影响着油藏的开发。毫无疑问，对油藏地球化学的研究必然需要了解储层的性能和空间展布。在油藏地球化学研究中，涉及到沉积储层的研究领域较多，如储层的有机-无机相互作用及其对储层的影响。沥青质的沉淀形成固体物质也许会充填进孔隙中而限制了油藏中的孔隙喉道，进而改变盆地评价中油藏质量评估的预测结果。蜡质和沥青一样可沉积在生产管道中从而导致运到储运罐的封存。

4. 石油工程

导致低效开采的作用包括：油藏异化、焦油席、沥青、蜡沥青等油源屏障的形成，油与矿物基质的相互作用，蜡质原油的低粘度以及原油生物降解作用等。对油藏中石油流体定位作用的理解，有机/无机相互作用性质的理解，以及对在初次、二次、三次采油过程中石油成分随时间变化的认识，将会导致对目前所采用的开采残余油的方法进行改进。另外，对油藏及开发地球化学问题的更好理解也将有助于更有效的油藏管理。其中，一个重要方面就是认识油藏内部连续性以帮助确定其他生产井的井位。油藏内部连续性及混合作用的确定，以及来自不同烃源岩的原油的定位，可通过全油气相色谱技术方便地进行研究。一个连续的油藏其原油具有相似的色谱指纹，而来自分隔油藏或单一油藏中不同分隔单元的原油，即使来自同一烃源岩，它们也有不同的指纹，尽管这种差别可能很微小。

5. 石油化学

此外，在预测何种类型原油可能与含蜡问题有关及蜡质沉积开始时间的确定上，地球化学也发挥了重要作用。蜡质沉积通常是由聚集和生产期间石油流体的超临界特征变化而引起的。深部油藏的温度也许会超过甲烷、乙烷等低分子石油组分的临界温度，而这些低分子化合物可作为高分子烃类的超临界溶剂。油藏压力在生产期间的降低将导致该超临界溶解体系

携带能力的降低与蜡质沉积。所形成的蜡典型地包含相对较高浓度的 C_{30} 以上甚至高达 C_{100} 的高分子烃类，但它们在由井头所采原油中并不见得能观测到。现在高温气相色谱柱与超临界流体色谱技术，就可对高达 C_{120} 的高分子烃类进行观测与描述。

沥青被典型地定义为“加入过量轻烃条件下沉积于原油以外的物质”。油藏内沥青的沉积导致了焦油席的形成。棒色谱扫描技术作为快速圈定油藏的方法业已在北海地区得到广泛应用，从侧向和横向上表明几个较薄焦油席的存在，假若它们未被检测出来，以后就会导致与生产有关的严重问题。

五、油藏及开发地球化学课程的学习方法

由于油藏及开发地球化学是一个新的发展领域，其研究成果远未成熟和系统化，因而对油藏及开发地球化学导论课程的学习，一要动态地学，把书本的学习和文献阅读结合起来。通过阅读最新的文献，随时掌握学科的最新发展。二是要辩证地学习，因为许多研究方法和成果尚待进一步完善，甚至有些研究是错误的。三是要活学活用。学习并不是以学习这些基本知识为主，而以学习研究方法，从各个相关的学科中接受新的思路 and 营养，“它山之石，可以攻玉”，并在学习的过程中创造性地吸收和思考。一切以解决油藏和开发过程中的实际问题为目的。

笔者认为，邓小平同志关于改革的两大理论：“摸着石头过河”的石头论及“不管黑猫白猫，逮住老鼠就是好猫”的猫论，对于我们油藏和开发地球化学的发展同样有一定的指导意义。油藏和开发地球化学是一项新的研究领域，需要我们“大胆创新，严密求证”。目前，石油开发在过去几十年中有了长足的进展，但是在多数油藏即使经过二次、三次采油技术的应用，通常仍有三分之二的原油保存在原地，因此，开发地球化学如何发展有效实用的技术就显得极为重要。我们不能以学科界定我们的研究领域，而应以解决问题为最根本的出发点，只要能将我们的地学和化学知识结合起来，能够解决勘探和开发中的实际问题，都是好的有效和实用的技术。因而本书只能作为油藏和开发地球化学的导论，希望能够“抛砖引玉”，满足广大地球化学工作者系统地接受这一新的学科生长点的要求，并能够为研究生的学习提供一个学习的初步蓝本。

第一章 油藏地球化学研究的理论基础

第一节 石油的物理性质和化学组成

一、石油的物理性质

石油的物理性质是人们最易观察的，如原油的密度、粘度和颜色等。这些少数易于观察和测量的物理性质，对于地质学家以及所有使用石油的人们的分析研究工作是很有意义的，当然，原油的物理性质主要是由它的化学成分而决定的。不同地质时期和盆地类型的原油，其组成变化很大，不同产地的原油都有其自身的特点，在原油中目前已找到数以千计的烃类化合物，这些化合物的含量变化决定了原油的物理性质。

1. 颜色和折光率

原油颜色主要与原油内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可以反映原油中重组分含量的多少。

目前我国发现的原油的颜色主要为棕黑色，部分凝析油呈透明状的橙色、棕黄色、黄色、浅黄色，有些甚至接近无色，这主要是饱和烃含量高，非烃和沥青质组分含量低所致。一般来讲，烷烃质石油通常均为浅色，透射光下呈黄至褐色，反射光下呈汽车引擎油样的熟悉的绿色。沥青基原油通常为褐色到黑色。

石油的折光率随相对密度而变化，大多数油样介于 1.42 至 1.48 之间。较轻的油折光率低，在低温条件下折光率也低。在任何一个分子量范围内，折光率从烷烃经环烷烃至芳香烃，依次增大。

2. 密度

石油的密度一般是指相对密度，即在 20℃ 单位体积石油的密度与 4℃ 相同体积水的密度之比。一般石油的相对密度介于 0.75 或略大于 1 之间。通常，重质石油是指相对密度为 0.92~1 (API = 22.3°~10°)，中质石油的相对密度为 0.87~0.92 (API = 31.1°~22.3°)，轻质石油的相对密度小于 0.87 (API 大于 31.1°)。石油的密度与颜色有一定的关系，一般淡色的石油密度小，深色的石油密度大。石油的密度与其化学组成，特别是胶质及沥青质含量以及石油的分子量和溶解气的数量相关。烷基石油普遍较轻，沥青基石油几乎总是重质的（密度通常用希腊字母 ρ 来标记）。现在在欧美国家比较通用的密度单位是 API。

API 与密度的关系为：

$$API = 141.5 / \rho - 131.5$$

图 1—1 为 API 与密度的关系图。从图中可以看出，不同密度的原油，取决于不同的化学组成。石油中典型化合物的密度及 API 参见图中所示。所以，在标准条件下，水的 API 度为 10°。

据概略换算，API 高于 31° 的石油可以被认为是轻质的；31°~22° 属于中等的，低于 22° 者即重质油。但这种标准也仅仅是一种大致的分类。在重质原油丰富的生产国，如委内瑞拉，API 为 20° 的油却被认为是中等密度的。世界范围的平均值是 API 为 33.3°。等级最好的原油约为 37° (API)，相当于相对密度 0.84。接近这种密度的原油在中东、美国，我国大

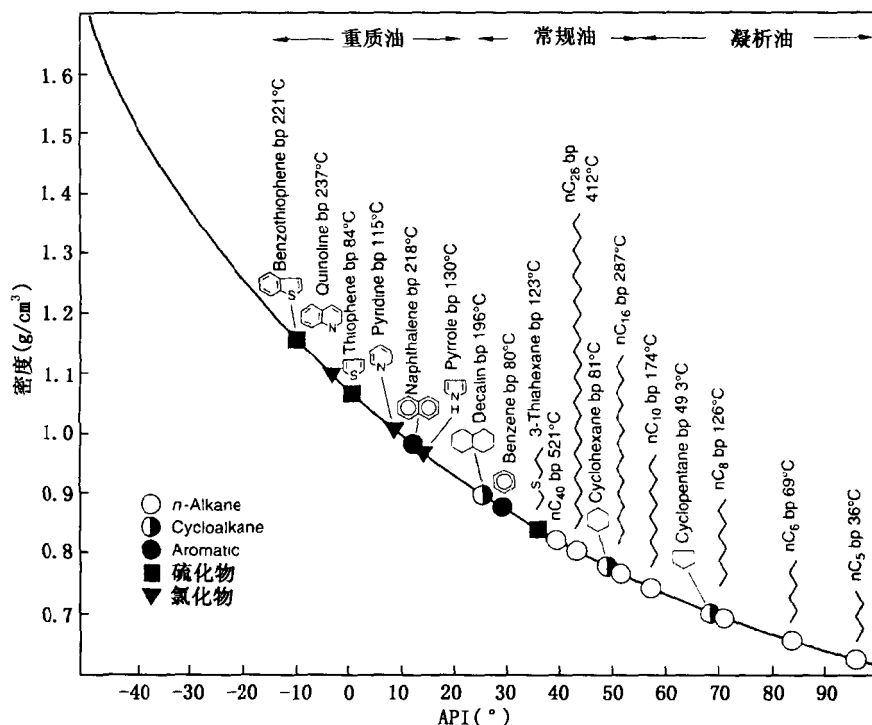


图 1—1 石油中典型化合物的 API 和密度分布图 (引自 Orr, 1988)

部分地区和阿巴拉契亚、阿尔伯达、利比亚以及欧洲北海都是很普遍的。表 1—1 列出了常见石油产品的密度和粘度。以我国松辽盆地为例，原油的相对密度主要在 0.84~0.88 (表 1—2)。我国其他典型地区原油的物理性质见表 1—3。

表 1—1 常见石油产品和水的性质

产 品	密度 (g/cm³)	API (°)	粘度 (mPa·s)
汽油	0.74	60	6
煤油	0.78	50	20
柴油	0.79	45	100
润滑油	0.85	30	500
残渣	1	10	>10 ⁵
水	1	10	10

表 1—2 松辽盆地北部各油层原油的物理性质综合表 (引自黄福堂, 1997)

油 层	相对密度	粘度 (mPa·s)	凝固点 (°C)	分子量	闪点 (°C)	蜡熔点 (°C)	含蜡 (%)	含胶 (%)	含硫 (%)	残碳 (%)	灰分 (%)
黑帝庙	0.8592	33.0	36.4	421.46	82.1	52.0	26.0	15.2	0.172	2.69	0.17
萨尔图	0.8939	113.4	24.6	507.16	125.3	44.3	24.7	20.0	0.144	3.93	0.27
葡萄花	0.8599	40.0	33.5	402.17	80.9	51.6	25.7	14.2	0.125	3.00	0.18
高台子	0.8618	72.1	29.4	393.87	97.0	51.4	24.9	13.1	0.093	2.92	0.33

续表

油 层	相对密度	粘度 (mPa·s)	凝固点 (℃)	分子量	闪点 (℃)	蜡熔点 (℃)	含蜡 (%)	含胶 (%)	含硫 (%)	残碳 (%)	灰分 (%)
扶余	0.8658	34.7	36.1	425.51	91.9	51.8	25.4	15.3	0.154	3.30	0.24
杨大城子	0.8612	67.1	34.3	430.21	93.0	51.8	25.7	14.2	0.146	4.11	0.21

表 1—3 我国典型地区原油的物理性质

地 区	正 常 原 油					降 解 原 油	
	时代	相对密度	蜡含量 (%)	硫含量 (%)	沸点 (℃)	相对密度	硫含量 (%)
松辽盆地	K ₂	0.84~0.85	23~26	0.06~0.10	26~32	0.95	0.14
黄骅坳陷	E	0.84~0.86	12~14	0.04~0.08	22~25	0.96	0.32
辽河坳陷	E	0.83~0.85	10~14	0.07~0.10	18~30	0.95	0.56
渤海地区	E	0.84~0.86	16~20	0.07~0.10	20~30	0.95	0.32
珠江口盆地	E	0.83~0.86	31~40	0.04~0.06	34~44	0.96	0.41
鄂尔多斯盆地	T ₃	0.82~0.86	14~15	0.05~0.09	14~20	0.92	0.07
准噶尔盆地	T ₁ 、T ₂	0.84	10	0.03	7	0.96	0.38

很轻的原油在 API 为 40°以上者，大量出现在阿尔及利亚、澳大利亚东南部以及印度尼西亚和安第斯山地区的一些油田。在我国的四川、吐哈、塔里木及其他等盆地也有分布。

很重的原油主要产自加利福尼亚洲、墨西哥、委内瑞拉和西西里。加利福尼亚圣玛利亚盆地中新统裂隙性储层的一些原油密度超过 6° (API)，含硫近 8%，这种油超出了一般的生产技术能力，除非加以人工稀释。比 API 为 0°更重的石油称之为超重油，密度超过 12° (API) 的石油实际上已经难于以密度为基础予以区分，而粘度却可提供一种更有用的区别标志。与此类似的是轻于 50° (API) 的油已经并非真正的油，而只不过是凝析油或蒸馏组分。

3. 石油的粘度

粘度是一种流体的内摩擦，对于改变流体形状形成阻抗。粘度是单位时间内应力对切变的比率；流体中的切变不是恒定的，但与时间成比例。因而，粘度代表基本的物理性质，可用以区别流体与弹性固体，后者对于弹性切变造成的形变产生瞬时阻抗而不是时效 (time—proportionate) 阻抗。这种瞬时阻抗在术语上称为固体的刚性，流体不具有刚性。

粘度由下列比率所限定：

$$\frac{\text{力} \times \text{距离}}{\text{面积} \times \text{速度}}$$

粘度直接随密度而变化，并因此而使原油的粘度也随碳原子数和原油中所溶解的气量而变。溶解气对原油粘度和 API 的效应如图 1—2 所示。

轻质油的粘度低于 30mPa·s，典型原油的粘度值介于 5.0mPa·s 和 0.6mPa·s 之间，后者为汽油的粘度。重的沥青质原油的粘度常以数千毫帕·秒计，如委内瑞拉西部玻利瓦尔滨岸油田的中新统原油为 50000mPa·s，阿尔伯达冷湖油田的重质油为 10⁵mPa·s，阿萨巴斯卡

“焦油砂”的焦油竟在 $10^6 \text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上。具有高于 $100 \text{mPa}\cdot\text{s}$ 粘度的烃类现被称为天然焦油。

沥青烯含量高的原油粘性太高，以致即使是在炎热的气候下也难以通过管线泵抽出，委内瑞拉西部波斯坎油田的原油以及若干加利福尼亚原油均为实例。在北美内地的寒冷气候下，焦油砂和油页岩的初次衍生物在地表可形成粘塑性的物质。

含蜡质的原油产地包括有：美国西部的尤因塔盆地；委内瑞拉东部的阿纳科趋势带；巴西的雷康卡沃盆地和阿根廷的曼多萨盆地；苏格兰东部岸外的比阿特里斯油田；里海以东的曼格什拉克盆地的一些油田（其中最大的乌津油田所产原油含蜡量为 26%）；利比亚的锡尔特盆地和苏丹的若干油田；东亚和澳大利亚年轻砂岩储层中的许多油田（如印度西部岸外和印度东北部上阿萨姆盆地的油田，该处的石油含蜡 10%~15%；产自中国、苏门答腊、澳大利亚岸外吉普斯兰盆地等处的大部分原油）。在有的丰产盆地中，原始石油曾是烷烃质的，而在年轻地层中转化过的油则是沥青质的。这样的丰产盆地有罗马尼亚的喀尔巴阡盆地和非洲岸外的尼日尔三角洲盆地。

烷烃质的或沥青质的原油，二者都可以经过地表或近地表的蚀变作用而遭受一定程度的挥发作用以致整个变干，其粘度之大，简直已成固体。这一干化过程称为蒸浓作用（inspissation）。

二、石油的化学组成

石油是一种复杂的多组分的均质混合物。其组成主要是烃类（烷烃、环烷烃和芳烃）和少量非烃组分（含氧、硫、氮的化合物）、胶质、沥青质等。

不同地区或不同油层的石油，具有不同的化学组成，因此，也表现出不同的性质。许多研究成果表明，用地球化学观点研究石油的化学组成，对于深入认识石油的形成、转化、运移、聚集、分布等问题，具有重要作用。元素组成是化学组成的基础。组成石油的元素主要是 C 和 H，其次是 N、S、O。C 和 H 二元素的含量一般为 96%~99%。其中 C 占 83%~87%，H 占 11%~14%。其余三种元素含量都很少，一般只占 0.5%~5%，个别情况，S 有时可达 5% 以上。石油中所含的元素绝大多数是以有机化合物形式出现的。一类是碳和氢元素组成的烃类，这是石油的主要化学成分；另一类是硫、氮、氧的非烃化合物，从数量上看虽处于次要地位，但很有意义，如含氮化合物含量虽然很低，但却极大地影响着石油对岩石的润湿性。

石油中碳、氢元素含量变化与石油的化学组成有密切关系。石油越重，其所含高分子烃就愈多，因此，在一定范围内，石油越重，则其含的碳就愈多，氢就愈少。硫、氮、氧元素的含量变化一般与石油中非烃化合物尤其是胶质、沥青质组成有关，随着石油的密度增加而增加（图 1—3）。

石油和有机质的元素组成都是以碳、氢为主，其次为硫、氮、氧，因此，石油和有机质的元素组成具有很大的相似性，这说明它们在成因上有密切联系。它们在元素组成上的差别

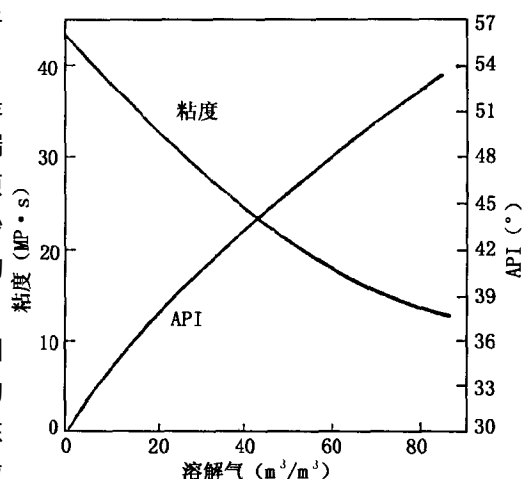


图 1—2 原油的物理性质和溶解气含量的关系图

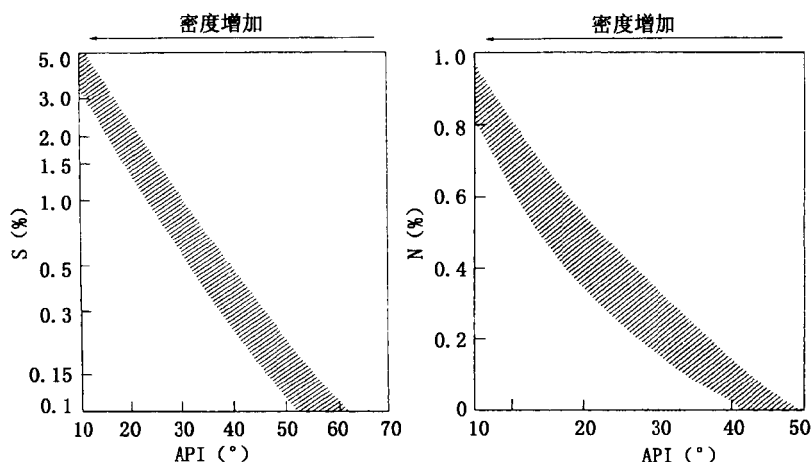


图 1—3 原油的硫含量、氮含量与原油密度的关系
(引自 Nelson, 1972)

表明，从原始有机质向石油转化的结果是碳和氢的增加，氧的减少。因此，就石油地球化学的元素变化来讲，石油形成的具体标志是“脱氧、加氢、富集碳”。应该特别指出脱氧、加氢、富集碳不是石油形成的全过程，如用元素演化情况来描述，它是原始有机质首先表现为逐步减氧、减氢、富集碳，最后裂解，突变成氧少、氢多、碳更多的石油。

除上述五种元素外，石油中还存在许多微量的金属和非金属元素。用发射光谱法和中子活化分析法在石油灰分中已发现 40 多种化学元素，如 Li, Na, K, Rh, Be, Mg, Ca, Ba, Ra, Al, Ga, TL, Pb, As, Sb, Cl, I, Cu, Ag, Au, Zn, Sc, La, Ti, V, Mo, Mn, Fe, Co, Ni, Ce, Nd, U 等。

在上述元素中，除硫、氧、氮在石油非烃化合物中还要介绍外，下面主要介绍两种具有一定地球化学意义而且研究较多的元素钒和镍。钒、镍是石油中常见的微量元素，其含量变动范围很大。

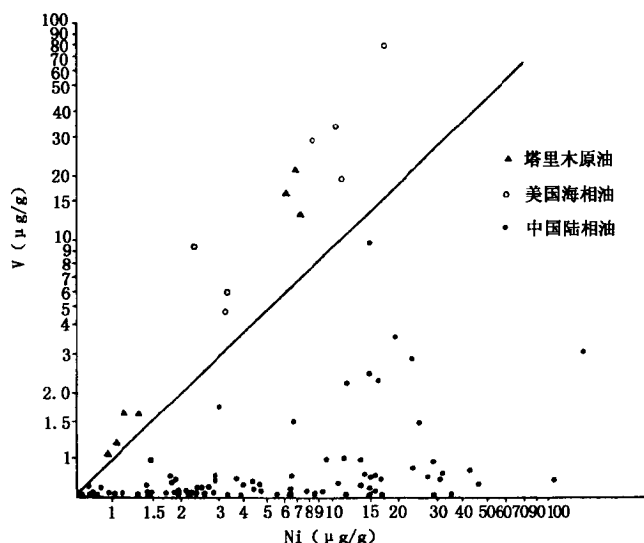


图 1—4 我国与美国、俄罗斯原油的钒、镍含量分布图
(据翟光明, 1997)

钒含量大小常与石油含硫程度有关。在高硫石油中钒的含量往往很高，这些石油中主要是钒—卟啉，即钒络合物形成的卟啉。这种石油钒镍比往往大于 1，在低硫原油中钒的含量通常是比较低的。在这种原油中，存在的主要是镍卟啉，其含量也比上述钒低。对我国原油钒镍含量的统计表明（图 1—4），在塔里木盆地石油钒镍比往往大于 1。

我国大多数盆地原油的钒镍比往往小于 1。有一种看法认为，原油中钒、镍、硫和卟啉化合物有一定共生关系。对钒镍的来源意见也不一致，有的认为该元素在石油中富集

主要与生油母质或生物化学作用有关。但也有人认为是次生的，主要来源于岩石中。看来，钒和镍主要来源于有机质的说法是比较可信的。因为镍可以作为催化剂，有很高的加氢性能，所以有些作者认为镍在石油灰分中存在，说明石油生成过程中加氢反应有极其重要的作用。

第二节 地层原油的高压物性

地层油的特点是处于高温高压下，并溶解有大量的天然气。显然，地层油的高压物性与地面原油性质有很大的差别，如粘度、密度和压缩系数等大不相同。在油藏开采过程中，随压力、温度的降低以及油中溶解气的不断释出，地层油的性质也在不断变化。因此，了解地层油物性的变化值及其影响因素，对油藏开采动态分析、渗流计算和工艺设计都是必不可少的。尽管压力和温度对地层油的高压物性有影响，但影响地层油高压物性的重要因素是原油中溶解气量的大小，后者通常用溶解气油比来表示。

一、地层油的溶解气油比

地层油的溶解气油比（ R ）系指在油藏温度和压力下地层油中溶解的气量。由于溶解气会使地层油的体积明显增加，故其溶解气量通常是对地面标准状况下单位体积原油而言，溶解气油比的单位是，每立方米地面原油在地下所溶解的标准状态下气体的立方米数。应该指出，地层油的溶解气油比和通常意义上的天然气在原油中的溶解度的概念实质上是是一致的。但因原油体积的参照状态不同，使得溶解气油比在数值上一般大于溶解度。

在油藏温度和原始压力下的溶解气油比称为原始溶解气油比。图 1—5 为一典型的地层原油脱气溶解气油比曲线图。由图可见，在油藏原始压力高于泡点压力 p_b 下的溶解气油比是相等的，即在高于泡点压力下，随压力增大，溶解气油比没有变化，当压力下降至泡点压力以下时，溶解气油比将随压力的降低而减少。

二、地层油的体积系数和压缩系数

在地层条件下， 1m^3 地面原油溶解的气体体积少则几立方米，多则达到 580m^3 （均在标准状态下）。正是由于地层油中总是溶解一定数量的天然气，故地面原油处于地下条件下，其体积总是有所增大；反之，地层油在地面脱气后其体积必然收缩。前者的体积增大值以所谓的“体积系数”表示；后者体积收缩的大小则以“收缩系数”为指标，两者互为倒数。地层油的体积系数又称为原油地下体积系数，它被定义为原油在地下的体积 V_f （即地层油体积）与其在地面脱气后的体积 V_s ，之比，即：

$$\text{体积系数 } B_o = V_f / V_s$$

一般情况下，由于溶解气和热膨胀的影响远超过弹性压缩的影响，地层油的体积总是大于它在地面脱气后的体积，故原油的地下体积系数一般都大于 1。地层油的体积系数与地层油溶解气油比曲线（图 1—5）有一定相似性，即当压力大于泡点压力 p_b 时，地层油的体

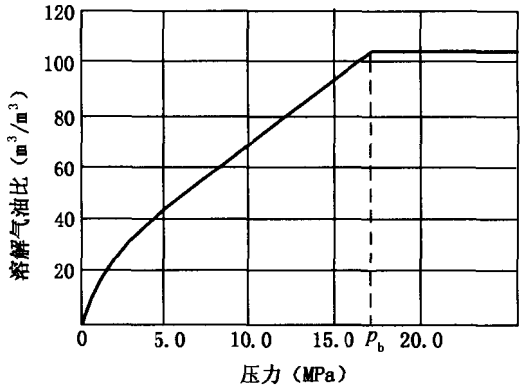


图 1—5 典型地层油在 71℃下溶解气油比与压力的关系图

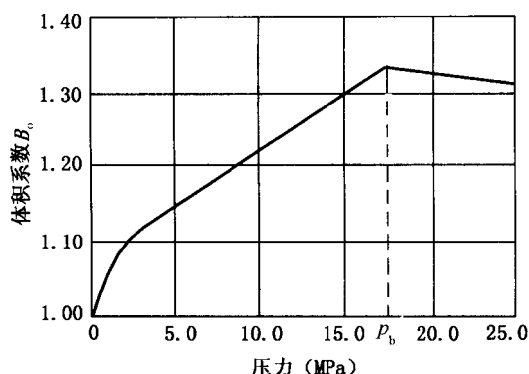


图 1—6 原油地下体积系数和压力的关系

积系数 B 。随压力的降低而增加，这是由于压力降低，单相地层油体积膨胀的结果；当压力小于泡点压力 p_b 时，地层体积系数随压力降低而减小，这是由于油中溶解气释出，地层油体积收缩的结果；当压力等于泡点压力时，地层油的体积系数达到最大值（图 1—6）。

原油地下体积系数在油藏开发计算中经常用到，它实际上是原油地下体积和地面体积的换算系数。有时在一些计算公式中还引用另一体积系数的概念，即两相体积系数。地层油的两相体积系数是指在油藏压力低于饱和压力时，在给定压力下地层油和其释出气体的总体积

（即两相体积）与原油在地面脱气后的体积之比，有关的计算可参见石油工程方面的参考书。

前面讲到，当压力高于泡点压力时，压力增减只表现为地层油体积的弹性压缩和膨胀，地层油中的溶解气使地层油的密度减少而且具有更大的弹性。地层的压缩系数是指压力变化 1Pa 时单位体积地层油的体积变化量。

三、地层油的粘度

地层油的粘度主要与油中的溶解气量及油中的温度有关。

地层油中溶解的气油量越大，粘度越低。这是由于油中溶解气体后，使得液体分子之间的引力变为气液分子之间的引力，而气液分子之间的引力远比液体分子之间的引力为小，从而导致溶解气体的原油的内摩擦阻力变小，造成地层油的粘度降低。

地层油的粘度随温度的增加而降低。

当地层压力高于泡点压力时，地层油的粘度随压力的增加而稍有增加。

地层油粘度和压力、温度的关系图参见图 1—7 所示。同时我国一些有代表性原油的高压物性资料参见表 1—4。

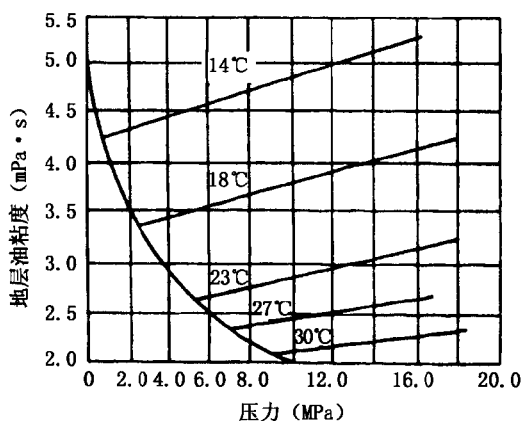


图 1—7 地层油粘度与温度和压力的关系图

表 1—4 我国一些地区地层条件下原油的高压物性资料

油 层	原始溶解的气油比 (m^3/m^3)	地层油的粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	体积系数 B_0	压缩系数 C_0 ($10^{-4}/\text{MPa}$)
大庆油田某油层	48.2	9.30	1.13	7.7
大港油田某油层	37.3	13.30	1.09	7.3
胜利油田某油层	70.1	1.88	1.22	—
孤岛油田某油层	27.5	14.20	1.10	7.3
任丘油田某油层	7.0	4.70	1.10	10.35
玉门油田某油层	65.8	3.20	1.16	9.6

第三节 天然气的流体性质

一、天然气的组成与分类

天然气主要是指碳氢化合物组成的气体。其常见的烃类有甲烷、乙烷、丙烷、丁烷、戊烷及戊烷以上烃类。非烃类气体主要有氮气、二氧化碳、硫化氢、氢等。

天然气是一种多组分气体，因而分类方法比较多。按照甲烷的含量分为干气（ $\text{CH}_4 > 95\%$ ）和湿气（ $\text{CH}_4 < 95\%$ ）。根据硫化氢的含量进行分类，如分为高硫化氢气体、（ H_2S 含量为 $2\% \sim 70\%$ ）、低硫化氢气体（ H_2S 含量为 $0.5\% \sim 2\%$ ）、微硫化氢气体（ H_2S 含量为 $0 \sim 0.5\%$ ）和无硫化氢气体。根据气体的相态进行分类，分为游离气、溶解气（指天然气溶解于石油或水中）、吸附气（指气体分子被固体所吸附）。根据矿藏分类，可分为气藏气、油藏气和凝析气藏气。根据硫的含量多少天然气可分为酸气和净气。

表 1—5 是根据天然气的密度、甲烷的含量等其他参数对天然气的性质分类。

表 1—5 天然气的性质分类表

油藏流体	地 面 状 态	气油比 (m^3/m^3)	气体相对 密度	液体相对 密度	典型组成 (摩尔%)					
					C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
干气	无色气体	无液体	0.6~0.65		96	2.7	0.3	0	0.1	0.4
湿气	无色气体, 少量透明—淡黄色液体	>17810	0.65~0.85	0.739~0.702	91.6	3.6	1.1	0.5	0.2	0.74
贫凝析气	无色气体, 淡色凝析油	900~18000	0.65~0.85	0.780~0.702	87.0	4.4	2.3	1.7	0.8	3.8
富凝析气	无色气体和黄—桔黄色液体	625~1430	0.65~0.85	0.80~0.76	68.0	6.23	2.37	2.07	1.21	9.35
临界液体	无色气体和黄—桔黄色液体		0.65~0.85	0.3924	59.7	2.9	6.53	3.92	1.96	12.58

二、天然气的粘度

粘度是表征气体或液体流动时分子之间内摩擦力大小的物性参数。天然气的粘度在标准状态下通常不超过 $0.01\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，而且分子量越高，粘度越小。在压力和温度增加时，气体的粘度变化趋势与液体的相反，是向增大方向变化，符合低压下气体粘度的特性。但在高压条件下（一般不超过 3MPa ），气体粘度变化趋势与液体相同，温度增加，气体的粘度降低；分子量增加，气体的粘度也增加。同时非烃气体如氮气、二氧化碳、硫化氢的粘度高于烃类气体。

三、天然气在水和原油中的溶解性

1. 天然气在水中溶解度的影响因素

(1) 地层压力和温度与天然气在水中溶解度的关系

一般而言，随压力增高，地层水溶解度逐步增加，但随着压力的进一步升高，地层水对天然气的溶解度达到一个溶解的极限，即压力再进一步升高，而溶解度增加幅度变小，而趋近于一个固定值。郝石生等（1989）进行的实验分析结果表明，在温度接近 80°C 时，天然

气溶解度较小，当温度大于 80 时，随温度升高天然气在水中溶解度逐渐增大。

(2) 地层水矿化度和水型与天然气溶解度的关系

根据郝石生等进行的实验分析结果表明，天然气在地层中的溶解度随矿化度的升高而降低。地层水型与天然气在水中的溶解度也有密切联系。根据郝石生教授等进行的模拟实验：在低压如 10~20MPa 条件下，天然气在硫酸钠水型比在重碳酸钠水型中溶解度大；而在高压如 30~40MPa 条件下，天然气在重碳酸钠水型中比在硫酸钠水型中溶解度大。在地质条件下，浅层多为硫酸钠水型，利于溶解生物成因气，随深度加深水型向重碳酸钠水型转变，同样利于天然气在水中溶解。

(3) 天然气化学组分与地层水中溶解度的关系

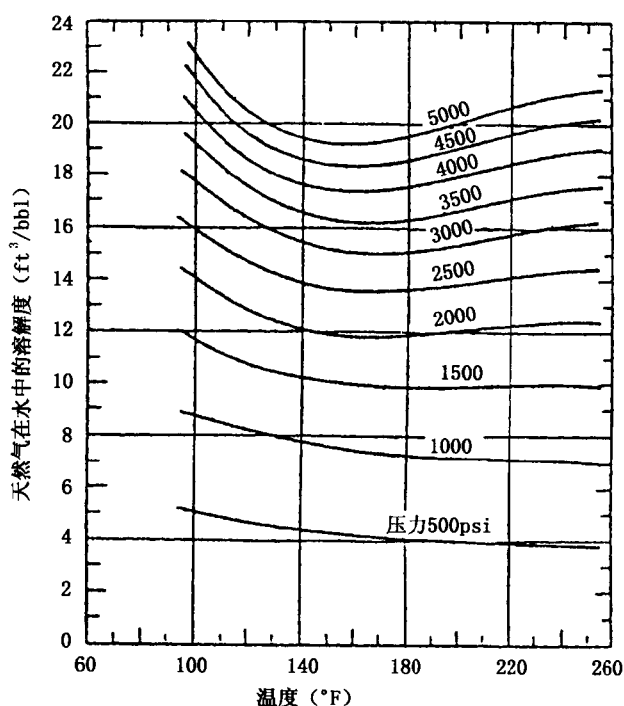


图 1—8 天然气在水中的溶解度
(据 Dodson 和 Standing, 1944)

总体而言，非烃气在地层水中的溶解度大于烃类气体。例如 CO_2 是天然气溶解前 5 倍， N_2 是天然气溶解前 2 倍以上，烃类气体在地层水中的溶解度随碳数增加而减少。溶解度的顺序是： $\text{CO}_2 > \text{N}_2 > \text{C}_1 > \text{C}_2 > \text{C}_3 > \text{C}_4$ 。

Dodson 和 Standing (1944) 使用了相对密度为 0.665 的气体，在淡水和盐水中进行了试验，至今对我们分析天然气在水中的溶解性仍具有参考意义 (图 1—8)。

2. 天然气在原油中的溶解性

总体来讲，单组分在液体中的溶解服从亨利定律，即在温度一定时，溶解度和压力成正比，即成直线关系。对于多组分的天然气，在压力不是很高时每一组分的溶解度可能遵守直线定律，但总的溶解度不符合亨利定律。有关天然气在原油中的溶解性在本章第二节中已有

介绍，在此就不赘述。

四、天然气的状态方程

天然气的压缩方程是油藏工程中最常用的一种状态方程。理想气体的状态方程为：

$$pV = nRT$$

式中 p ——气体压力，Pa；
 V ——在压力 p 下气体的体积， m^3 ；
 T ——绝对温度，K；
 n ——气体的摩尔数；
 R ——通用气体常数，等于 $8.314\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

天然气是一种多种组分的混合物，与理想气体不同。理想气体分子则假设是无体积大小和质量的质点，而且分子之间不存在作用力。真实气体分子有一定的体积和质量，而且分子之间有作用力。因而只有在低压下才可考虑把理想气体的状态方程应用于天然气的 pVT 计算；而在高压下必须对理想气体状态方程进行修正，即引入一系数 Z ，从而得到天然气的压缩状态方程为：

$$pV = ZnRT$$

式中， Z 通常称为压缩因子，它是给定压力和温度下，实际气体占有的体积与相同压力和温度下的理想气体所占有的体积之比。实际气体由于分子本身具有体积，故较理想气体不易压缩；而分子间的引力又使实际气体较理想气体易于压缩。压缩因子之大小恰恰反映出这两个相反因素的综合结果。当 Z 值大于 1 时，即气体较理想气体难压缩；而当 Z 值等于 1 时，实际气体成为理想气体。 Z 值大小与气体性质、温度和压力有关，通常必须用实验测出，做成图版备查（可参考石油工程方面的参考书），也可以用相关式计算。

对应状态定律在气体参数计算中应用也相当广泛。其内容是：在相同的对应温度和对应压力下，所有的纯烃气体具有相同的压缩因子。这里的对应温度和对应压力是指气体的温度与压力分别除以该气体的临界温度和临界压力所得的比值。上述状态定律同样适用于多组分烃混合气体的天然气。需要注意的是天然气没有真实的临界参数值，从而提出了天然气的视临界参数，其值可根据各组分的临界参数和各组分的摩尔分数，利用加权平均法求得。

五、天然气的体积系数和压缩系数

一定质量的天然气在油气藏条件下所占的体积与标准状态下（20℃， $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ）所占体积之比称为天然气的地下体积系数。气体的等温压缩系数亦称为气体压缩系数，是指等温条件下单位体积气体随压力变化的体积变化率。

第四节 流体体系和油气藏流体的分类

一、单组分体系（纯物质）

纯物质的相特性取决于三个变量：压力、温度和体积。图 1—9 展示了纯物质（或单组分，如丙烷）的压力—温度相图。分开液气区的线段 TC 叫做蒸气压线，由于这一原因，单组分组的 $p-T$ 图也常称为蒸气—压力曲线。TC 线上的压力—温度点确定了气—液平衡共存的条件，点 C 是临界点，它由临界压力和临界温度所确定。在临界压力以上，不管温度高低，都不能气液共存。同样，在临界温度以上，不管压力高低，气体再也不能被液化。

我们将看到表明两相存在的弯月面。另外，我们也可从点 1 出发（图 1—9）等压提高温度到大于临界温度的点 2；从该点再等温升压到临界压力以上的点 3；从这里再等压降温到临界温度以下的点 4；然后再等温降压到点 5。以这种方式，从气态进入液态时就看不到弯月面了。实际上，这一方式通过的是密集流体区。

二、二组分体系

虽然油藏工程师通常面对的是多组分体系，但研究一下二组分的相特性也是有益的。二组分体系与纯物质间的差别在多组分体系中会更有所扩大。图 1—10 是 50/50 组分混合物的相态图（压力—温度）。注意，这里不再只是蒸气压曲线（该曲线描述了气液平衡共存点），而变为一个“相包络线”，即变为具有一定宽度面积的两相共存区。相包络线的上边界线是