

油气二次运移和聚集物理模拟

曾溅辉 金之钧 等著



石油工业出版社

油气二次运移和聚集物理模拟

曾溅辉 金之钧 等著

石油工业出版社

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是国内外第一部系统论述油气二次运移和聚集物理模拟的专著,全书共分七章,首先概述了油气二次运移和聚集的基本理论,然后介绍了油气二次运移和聚集物理模拟技术和方法,最后系统论述了孔隙尺度下、均质和非均质砂层、断层和不整合输导系统、背斜和岩性圈闭系统及地层温压条件下油气二次运移和聚集的物理模拟实验结果及其应用,总结了上述系统中油气二次运移和聚集机理。

本书适合于石油勘探及开发科研人员以及石油和地质院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气二次运移和聚集物理模拟/曾溅辉等著.

北京:石油工业出版社,2000.10

ISBN 7-5021-3152-3

I. 油…

II. 曾…

III. ①油气运移:二次运移—物理模拟

②油气聚集—物理模拟

IV. P618.130

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 75044 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 403 千字 印 1—1000

2000 年 10 月北京第 1 版 2000 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3152-3/TE·2399

定价:30.00 元

序

石油与天然气不同于其它固体矿产：它的赋存状态为气态或液体，且多相并存。从烃源岩进入储层，形成油（气）矿藏，常处于运移流动状态。只有进入圈闭后的暂短稳定时期，人类进行勘探工作，发现其产地和埋藏深度，探明其储量规模大小后，才具有经济上的价值。

根据长期的油气勘探实践和理论研究，我国石油地球科学工作者历来重视油（气）藏形成过程中“生、储、盖、圈、运、聚、保”等诸因素相互匹配和连续进程。在陆相生烃理论、多油层储层划分精细对比研究、盖层和保存条件等方面取得了丰硕的研究成果。在圈闭的探索和评价，与圈闭有关的断裂系统的研究和标定方面，更是投入了大量人力物力，二维与三维地震技术突飞猛进，成绩喜人。但在油气运移和聚集机理的研究方面，由于时空的复杂性和对象的多变性，进展比较缓慢。

1933年美国石油地质家 Illing V.C. 首先开展了石油和天然气运移问题的研究，Muskat M. (1949) 从理论上阐述了油气藏的形成过程。其后 Hubbert M.K. (1953), Gussow W.C. (1954), Aschenbrenner B.C 等 (1960), Berg R.R. (1975), Mc Auliffe C.D. (1979), Sohowalter T.T. (1979), Hunt J.M. (1990), Catalan L. 等 (1992) 和 Michele M.T. 等 (1995) 等均先后开展了有关油气二次运移的物理模拟实验研究工作。我国虽然起步较晚，但陈章明 (1980)、陈荷立 (1983)、张义纲 (1991)、郝石生 (1991)、李明诚 (1994) 教授等对油气初次运移、二次运移与聚集和物理模拟等方面各自进行了研究。1994年中国石油天然气总公司加大了这方面的科技投资力度，在石油大学（北京）建立了“油气成藏机理模拟实验室”，研制了一维高温高压模拟实验系统，二维高温低压模拟实验系统和多功能岩心流动实验装置等。开展了对塔里木盆地库车坳陷克拉2气田白垩系气藏含气饱和度增长机理的物理模拟；对松辽盆地大庆长垣隆起—齐家古龙生油凹陷之间石油运移路径和通道的模拟实验研究；对渤海湾盆地沾化凹陷上第三系油藏断层输导系统和不整合输导系统石油运移和聚集的物理模拟实验；并对塔里木盆地满加尔坳陷下古生界不整合面输导系统石油运移和聚集进行了物理模拟。现在石油大学（北京）以曾溅辉博士和金之钧教授为首的一批中青年科学家将以上实验研究成果汇编成《油气二次运移和聚集物理模拟》一书，即将付印出版。这将为我国各油区地球科学工作者研究油气运移和聚集提供一份有价值的参考材料。希望在这一领域工作的科学家们不断取得新的研究成果。更好地解决石油地质问题、油（气）田开发问题和环境科学问题。

中国科学院院士



2000年8月

前 言

随着计算机技术的快速发展,数值模拟技术已被广泛地应用于盆地形成演化与油气运移聚集机理的研究中。自 80 年代以来研制的盆地模拟技术已在油气勘探和开发中得到广泛应用,但油气运移和聚集的物理模拟则进展缓慢,以至于油气运移和聚集机理及相关参数目前还处在假设与推测阶段,大大地限制了盆地模拟等技术的应用。实际上物理模拟是现代科学发展的一个重要支柱,也是油气运移和聚集研究的重要手段,在发展石油地质理论和指导石油勘探和开发实践中发挥着极其重要的作用。在计算机技术快速发展的今日,物理模拟的地位同等重要。基于上述原因,在张一伟教授等老一辈石油地质学家的积极倡导和支持下,石油大学(北京)投资近千万元人民币,由金之钧教授和曾溅辉博士等负责建设“油气成藏机理模拟实验室”,并将该实验室列为石油大学“211 工程”重点建设项目。经过 5 年多的努力,目前该实验室初具规模,已自行研制了具有国际水平的一维高温高压模拟实验系统、二维高温低压模拟实验系统和多功能岩心流动实验装置等,可以进行地层温压条件下油气生成、运移、聚集、保存和破坏,流体-岩石相互作用与储层评价和成岩作用等物理模拟研究,初步形成了国内油气成藏机理实验研究和人才培养的基地。本书的大部分研究成果是在该实验室完成的。

油气二次运移和聚集物理模拟近年来取得了很大的进展,但是目前国内外还没有一部系统论述油气二次运移和聚集物理模拟的论著,这在一定程度上阻碍了油气二次运移和聚集物理模拟技术以及油气二次运移和聚集理论的发展。为此,我们基于近 6 年来在油气成藏模拟实验室建设、油气二次运移和聚集物理模拟技术开发、实验研究及应用过程中的工作总结与研究成果,结合近年来国内外最新研究成果与动态,系统地阐述了油气二次运移和聚集物理模拟的基本原理、模拟技术和方法,深入探讨了孔隙尺度下、输导砂层系统、断层和不整合输导系统、背斜和岩性圈闭以及地层温压条件下油气二次运移和聚集机理及其应用。其特点是以地质模型为基础,以实验原理和模拟过程为纽带,以揭示油气成藏机理为目的,将地质模型-实验原理-模拟过程-揭示机理有机地融为一体。

本书共分 7 章。第一章概要地论述了油气二次运移和聚集的基本理论;第二章系统地介绍了油气二次运移和聚集物理模拟实验装置和实验模型以及物理模拟的相似准则;第三章介绍了孔隙尺度下的油气运移和聚集的物理模拟及其应用;第四章系统介绍了均质和非均质砂层石油的运移和聚集物理模拟,首先讨论了实际地区均质砂层、层间非均质砂层和层内非均质砂层油气运移、聚集和分布的地质模型,然后介绍了实验模型的概化以及不同条件下的物理模拟结果,最后讨论了均质和非均质输导砂层石油的运移和聚集机理;第五章分别以沾化凹陷上第三系油气成藏和塔里木盆地油气沿不整合面运移地质模型为基础,介绍了断层和不整合输导系统油的运移和聚集的物理模拟,重点讨论了在单一油相连续充注、油/水两相连续充注、单一油相幕式充注和油/水两相幕式充注条件下,断层对油的输导作用和能力、断层两侧砂体中石油的运移和聚集机理;第六章在介绍背斜圈闭油气运移和聚集的地质模型和东营凹陷岩性油气藏成藏特征的基础上,讨论了背斜和岩性圈闭系统石油运移和聚集的物理模拟,重点论述了均质砂层、正韵律砂层、反韵律砂层和复合韵律砂层组成的背斜圈闭系统

以及砂岩透镜体中油的运移和聚集模拟实验结果及其机理分析；第七章在讨论油气的热对流循环运移和聚集理论研究和地质分析以及论述幕式或突发式油气运聚成藏的地质证据的基础上，引用了张义纲等人（1997）的热对流作用下油气运移模拟实验和混相涌流模拟实验成果，详细讨论了地层温压条件下的油气运聚成藏机制。

本书属于中国石油天然气集团公司“九五”重大科技攻关项目“输导层和圈闭系统油气运移和聚集动力学机制及定量模型”（编号 960007-04-03）、教育部“高等学校骨干教师资助计划”项目“断裂输导系统油气运移和聚集的实验模拟”以及国家重点基础研究规划“973”项目（编号 G1999043309）的部分成果。

本书前言由曾溅辉、金之钧编写，第一章由金之钧、任玉良、曾溅辉编写，第二章由曾溅辉、金之钧编写，第三章由金之钧、贾红育编写，第四章由曾溅辉、郑和荣、吴胜和和王洪玉编写，第五章第一节至第三节由曾溅辉、金之钧、张善文、贾红育和王洪玉编写，第四节由吕修祥、金之钧编写，第六章由曾溅辉、王洪玉、金之钧编写，第七章由金之钧、曾溅辉编写。曾溅辉、金之钧对全书进行了统稿，王洪玉、宫秀梅、李娜和任玉良进行了大量的资料整理和图件绘制工作。

在本书的编写过程中得到张一伟教授、王捷教授、傅诚德教授、关德范教授、石宝珩教授、张义纲教授，盆地与油藏研究中心庞雄奇教授、汤良杰教授及中心全体人员，胜利石油管理局吕成远高工、李学田高工、王永诗高工、王宁高工、闵令元工程师、王建工程师、石砥石工程师以及西北大学张金功副教授等的关心、指导和支持，在此表示衷心的感谢。由于水平有限，不妥之处，敬请指正。

作 者

2000.7.30

目 录

第一章 油气二次运移和聚集的基本理论	(1)
第一节 油气二次运移的相态	(1)
第二节 油气二次运移和聚集的动力学分析	(2)
第三节 油气二次运移方向和方式	(10)
第四节 油气二次运移通道和运聚效率	(14)
第五节 圈闭系统油气聚集机理和模式	(20)
第二章 油气二次运移和聚集物理模拟实验装置和相似准则	(25)
第一节 物理模拟实验研究现状和发展趋势	(25)
第二节 物理模拟实验装置和实验模型	(27)
第三节 物理模拟的相似准则	(37)
第三章 孔隙尺度下油气运移和聚集的物理模拟及其应用	(50)
第一节 孔隙尺度下油气运移和聚集模拟实验方法	(50)
第二节 五号桩油田沙河街组第三段下部第二砂层 (S_{3T}^{II}) 油藏残余水形成 (油驱水) 机理的实验研究	(50)
第三节 克拉 2 气田白垩系巴什基奇克组气藏含气饱和度增长机理的物理模拟	(56)
第四章 均质和非均质砂层石油运移和聚集的物理模拟	(61)
第一节 均质和非均质砂层油气运移和聚集的地质研究	(62)
第二节 均质和非均质砂层石油运移和聚集的模拟实验方法	(71)
第三节 均质砂层石油运移和聚集的物理模拟	(72)
第四节 层间非均质砂层石油运移和聚集的物理模拟	(74)
第五节 正韵律砂层石油运移和聚集的物理模拟	(83)
第六节 反韵律砂层石油运移和聚集的物理模拟	(100)
第七节 复合韵律砂层石油运移和聚集的物理模拟	(108)
第八节 输导砂层油气运移和聚集的几个问题的讨论	(114)
第五章 断层和不整合输导系统石油运移和聚集的物理模拟及其应用	(121)
第一节 断层对油气运移和聚集影响的地质分析	(121)
第二节 断层输导系统石油运移和聚集的物理模拟	(127)
第三节 断层输导系统油气运移和聚集机理及模式	(174)
第四节 不整合输导系统石油运移和聚集的物理模拟	(180)
第六章 背斜和岩性圈闭系统石油聚集的物理模拟	(184)
第一节 背斜和岩性圈闭系统石油聚集的地质模型	(184)
第二节 背斜圈闭系统石油聚集的物理模拟	(190)

第三节 岩性圈闭系统石油聚集的物理模拟..... (206)

第七章 地层温压条件下油气运聚成藏的物理模拟..... (213)

第一节 地层温压条件下油气运移机制的研究现状..... (213)

第二节 热对流循环作用下油气运聚成藏的物理模拟..... (214)

第三节 油气幕式或突发式运聚成藏的物理模拟..... (223)

参考文献..... (236)

第一章 油气二次运移和聚集的基本理论

油气二次运移是指油气由生油（气）层进入运载层后的一切运移，它发生在储层内，或者从一个储层到另一个储层的过程中。运载层除了渗透性地层外，还可以是不整合、微裂缝、断层或断裂体系、古老的风化带或刺穿的底辟构造等。油气二次运移机理包括油气二次运移相态、动力、运移通道、运移方向、运移距离、运移时期、运聚效率和散失量等，它是油气运移和聚集的核心问题，也是石油地质学研究的重要内容。但是由于油气二次运移的研究难度较大，许多油气二次运移和聚集的机理和认识仍停留在推理阶段，导致油气二次运移和聚集成为石油地质研究中最为薄弱的环节。本章将从油气二次运移的相态，油气二次运移和聚集的动力学分析，油气二次运移方向、路径通道和运聚效率，以及圈闭系统油气聚集机理和模式等几方面综述前人在油气二次运移和聚集的主要研究成果和认识。

第一节 油气二次运移的相态

一、石油二次运移相态

石油初次运移的相态可以是水溶相、气溶相和连续油相，但最有实际意义的是连续油相运移，这种情况对二次运移来说也是如此（李明诚，1994）。石油二次运移的主要相态是连续油相，很少为水溶相和气溶相。因为水溶相、气溶相进入储层后由于物理条件的变化最终也成为游离相。即石油以水溶相运移进入储层，随着温度、压力的降低，盐度的增高，石油在水中的溶解度也随之降低，再加上水中 CH_4 、 CO_2 等气体的析出和胶束溶液被大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 所破坏，结果使在高温下或饱和气体溶液中以及被胶束所增溶的油，都可能从水溶液中卸载出来成为游离相。

但是，由于二次运移是初次运移的继续，因而二次运移开始阶段的相态势必受到初次运移相态的影响，又因运载层的环境与生油（气）层有较大的不同，故初次运移中的各种相态在二次运移中区别很大，尤其是在二次运移的效率上差别很大。水溶相、气溶相运移进入储层后，随着温度、压力场等条件的变化，石油逐渐分离出来，因此石油几乎是分散在整个储层中，这些分散的油滴继续进行二次运移十分困难，除非有机会连成较大油体后才有可能。McAuliffe（1979）认为：石油以水溶相方式进行二次运移的效率是很低的。如果初次运移是连续相则不同，虽然石油进入储层后由于自由水的增多而由连续油相变成分散的油珠，但它们可以较快地得以补充，在储层底部或顶部聚集，形成较大油体后开始二次运移。由此可见，在二次运移中石油的游离相更为重要，甚至是惟一的相态。

二、天然气二次运移相态

天然气的初次运移相态可以是水溶相、油溶相、气相和扩散相，它们发生在不同的深度上，而且不同时期都可以造成大量天然气的运移。在二次运移中，这几种相态均可存在，但其重要性有明显的差别（李明诚，1994）。

水溶相天然气运移进入储层之后，随着储层温度、压力等因素的改变，天然气最终从水中析出成为游离相。目前关于天然气如何析出以及何时析出的问题并没有得以解决，即使有

天然气析出也是分散的，这些孤立天然气的二次运移也遇到了同水溶相石油二次运移一样的问题。因此天然气水溶相运移没有太大意义。

天然气以油溶相进入储层后分为三部分：一部分仍留在油中并随油一起二次运移；一部分溶于水随水运移；剩余的才析出成为游离气。其中只有以油溶相继续运移进入圈闭后析出的才具有实际意义。

游离气相进入储层后，可直接在储层底部或顶部聚集，当达到一定规模后开始二次运移。

只要有浓度差存在，天然气的扩散可以在任何时间、任何地点发生。天然气可呈扩散相运移，这是不同于石油运移的最大特征。天然气的扩散不但不能导致天然气的聚集，反而导致了天然气的散失。因此对二次运移和聚集来说，扩散起消极作用，只有当地层保存一定的含气浓度以便达到聚散的平衡，才能使气藏得以保存。

由以上对油气二次运移相态的分析可以看出，油气从水溶状态相变为游离状态进入二次运移相当困难，而油气的聚集又表现为游离相，因此油气二次运移一开始就很可能要求是游离相态，但对天然气来说油溶相运移也具有一定的意义。

第二节 油气二次运移和聚集的动力学分析

一、油气二次运移的动力和阻力

油气进入运载层后，主要在构造应力、浮力、水动力、热动力、毛细管力和质量扩散力等一种或几种力的作用下进行二次运移，然后在圈闭中聚集。

1. 构造应力

地壳运动会在岩层内部表现出大小和方向各异的应力活动，如压应力、张应力或剪应力等各种应力，当它们超过了岩石的一定强度，就会使岩层变形或变位，造成各种褶皱和断裂，并驱使沉积物中所含流体发生运移。这种由地壳运动造成的各种地质构造应力，对油气运移产生重要影响。

在沉积盆地中，构造应力可以形成褶皱、断裂和各种不整合。褶皱结果使地层发生倾斜，断裂和裂缝可将岩层中的各种原生和次生孔隙连通，而不整合面又常形成风化带或地下水溶蚀带，因此构造应力为油气运移创造了极有利的条件（张厚福等，1989）。

构造应力也能促使油气运移。当沉积物的成岩作用和褶皱作用同时进行，构造应力必然会传递到沉积物中所含的流体，促使油气由高压区向低压区运移。在此时期，沉积物正在固结成岩，岩性因素阻碍小，流体可以进行大规模运移。但是，目前关于构造应力如何驱动油气运移，以及构造应力对油气运移作用的定量表述还不清楚。

2. 浮力

油气以游离相进行二次运移时其动力主要是浮力，由于油气二次运移以游离相最为重要，所以浮力是最主要的动力。

众所周知，油（气）在水中的浮力是由于油（气）与水两种物体密度不同而产生的。游离相油（气）在水中受到的浮力用公式可表示为

$$F = V(\rho_w - \rho_o)g$$

式中 F ——浮力，Pa；

V ——连续油的体积, m^3 ;
 ρ_w ——地层水的密度, kg/m^3 ;
 ρ_o ——地下石油密度, kg/m^3 ;
 g ——重力加速度, $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。

而单位面积上高为 Z 的油柱所产生的浮力用公式可表示为

$$F = Z(\rho_w - \rho_o)g$$

此时 F 表示单位面积上高为 Z 的油柱受到的浮力, 单位为 Pa 。可见, ρ_w 与 ρ_o 相差越大、 Z 越高, 则油柱所受浮力 F 越大。

3. 水动力

水动力为推动地层中孔隙水流动的压力。地层中的水动力可以由差异压实和水势差产生。前者多出现在地层压实过程, 称为压实水流; 后者多出现在岩层与地表有连通的情况下, 称为大气水流 (李明诚, 1994)。水动力是水溶相二次运移的惟一动力, 这是毫无疑问的。下面主要强调水动力对游离相二次运移的影响。

在盆地持续下沉、大量接受沉积的时期, 压实作用明显, 盆地中主要是压实水流。水动力梯度是由不均一的沉积负荷和差异压实引起, 水流方向主要从盆地中心向盆地边缘, 由深处向浅处。水流方向与油气运移的大方向一致, 有利于油气的运移和聚集。随着盆地的演化和成岩变化, 压实作用变得越来越不明显, 加上后期的地壳运动、地层的翘倾和上拱甚至褶皱, 使地层在盆地边缘出露并与大气水相通形成向盆地中心倾斜的水势面, 大气水由盆地边缘势位高处流向势位较低处的盆地中心。后期的这种水流与油气运移的大方向相反, 虽然在适当的条件下可以形成水动力圈闭, 但是当水动力太强时往往把已聚集的油气冲走, 造成油气藏的破坏。总的说来, 早期由压实水流产生的水动力有利于二次运移, 决定了盆地中油气最初的聚集和分布, 使二次运移在新的方向上, 以新的规模进行调整。可见, 水动力对油气的二次运移和聚集可以产生积极的和消极的双重作用。这取决于水动力的方向。

水动力不仅影响二次运移动力的大小, 还影响着油气运移的方向。

在静水条件下, 水不流动, 此时水势面平行于基准面呈水平状, 油气运移的方向只取决于浮力, 即在浮力作用下垂直向上直至盖层之下, 受盖层限制时沿上倾方向运移 (李明诚, 1994)。

动水条件下, 水势面为由静水条件下的水平方向向水流方向倾斜的平面, 等势面的法线就是流动方向, 油气运移方向是水动力和浮力的合力方向, 油势面和气势面作相应的偏转, 此时油、气、水将分别沿各自等势面的法线方向流动。当水动力梯度一定时, 这种力的大小取决于油水之间的密度差。如果石油的密度和水很相似, 那么它们的运动方向就很一致。由于气水之间密度差大, 所以气体运移的方向比石油更接近于垂直。如果求得水中的油势、气势以及它们的等势面, 那么就可以知道水中油、气各自的运移方向 (图 1—1)。

含水层中的水头为

$$h_w = \frac{p}{\rho_w g} + Z$$

式中 h_w ——总水头;
 p ——地层压力;

ρ_w ——水密度;
 g ——重力加速度;
 Z ——高程水头。

含水层中的油头为

$$h_o = \frac{p}{\rho_o g} + Z$$

式中 h_o ——总油头;
 $p/(\rho_o g)$ ——测压油头;
 p ——地层压力;
 ρ_o ——油密度;
 g ——重力加速度;
 Z ——高程油头。

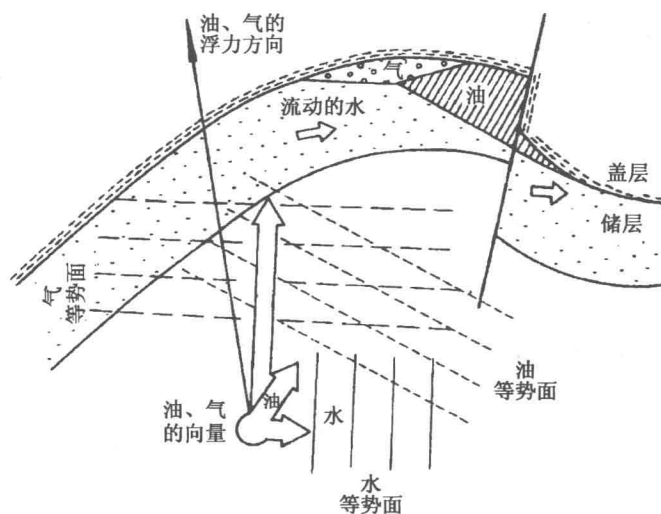


图 1—1 在动水条件下油、气、水等势面的方位和油气运移的方向 (据 E.C.Dahlberg, 1982)

含水层中的气头为

$$h_g = \frac{p}{\rho_g g} + Z$$

式中 h_g ——总气头;
 $p/(\rho_g g)$ ——测压气头;
 p ——地层压力;
 ρ_g ——气密度;
 g ——重力加速度;
 Z ——高程气头。

已知水势来推知水中的油势可用以下方程

$$\frac{\rho_o}{\rho_w - \rho_o} h_o = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_o} h_w - Z$$

令

$$\frac{\rho_o}{\rho_w - \rho_o} h_o = U_o; \quad \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_o} h_w = V_o$$

则上述方程可写成

$$U_o = V_o - Z$$

同理

$$\frac{\rho_g}{\rho_w - \rho_g} h_g = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_g} h_w - Z$$

令

$$\frac{\rho_g}{\rho_w - \rho_g} h_g = U_g; \quad \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_g} h_w = V_g$$

则上述方程可写成

$$U_g = V_g - Z$$

因此, 只要实测出水势 (h_w) 和地下油、气、水的密度 (ρ_o 、 ρ_g 、 ρ_w), 就可以计算出油势 (U_o) 和气势 (V_g), 据此就能做出等油势面和等气势面。垂直于等油 (气) 势面的法线方向即为油 (气) 运移的方向, 在等油 (气) 势线形成圈闭的地方就是油 (气) 可能形成圈闭的位置。这种利用水动力研究油气运移、聚集的方法又称为 U 、 V 、 Z 法 (E.C.Dahlberg, 1982)。

4. 热动力

当孔隙介质的温度不同时, 就会进行能量和物质的交换。由于温度不同, 造成能量和物质传递的力为热动力。热动力对深部流体的运移起十分重要的作用。由物质接触或由热传导、热对流和放射性物质衰变所产生的热动力是深部流体进行运移的一种主要动力, 它使深部流体由深部向浅部运移。此外, 由于热作用, 地下某些区域可以产生异常高压带, 在一定的构造作用下, 异常高压带发生破裂, 从而使高压带内的流体发生大规模的运移 (陈红汉等, 1996)。

5. 毛细管力

储层一般为砂质岩石, 其孔隙直径一般介于 $0.2 \sim 500 \mu\text{m}$, 属毛细管孔隙。油气在进入储层之前, 储层中颗粒表面大多为水所润湿, 所以油气在储层中运移的过程实际上是一个由非润湿相驱替润湿相的过程, 油气必然要受到毛细管力的限制。

众所周知, 毛细管力的大小取决于两种流体间的界面张力、毛细管半径和介质的润湿性, 在单根毛细管中, 毛细管力的大小可用公式表示为

$$p_c = 2\delta \cdot \cos\theta / r$$

式中 p_c ——毛细管力, Pa;
 δ ——界面张力, Pa;
 θ ——润湿角;
 r ——毛细管半径, m。

在自然界中, 储集岩都是由不同孔径的三维空间介质所组成, 当进入储集岩中的油气通过两端孔径不同的喉道时, 油气所受到的毛细管阻力实际上是两端不同孔径的毛细管压力差, 用公式可表示为 (Berg, 1975)

$$p_c = 2\delta \left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p} \right)$$

式中 p_c ——毛细管力;
 δ ——界面张力;
 r_p ——孔隙半径;
 r_t ——喉道半径。

如图 1—2 所示, 假定储层由均匀球形颗粒组成, 孔隙内充满水, 颗粒表面被水所润湿, 孔隙半径为 r_p , 喉道半径为 r_t , 在静水条件下有一油珠上浮, 现在分析油珠所受毛细管力的情况。图中 A 处浮力不足以使油珠变形而进入喉道, 油珠与周围水处于平衡状态。B 处浮力或其它处力使油珠变形, 顶端进入喉道, 上端毛细管力 $p_u = 2\delta / r_t$, 指向下, 下端毛细管力 $p_d = 2\delta / r_p$, 指向上, 因为 $r_t < r_p$, 所以 $p_u > p_d$, 毛细管力对油珠表现为阻力。C 处油珠两端界面曲率半径相等, 两端毛细管力也相等, 此时毛细管压差等于零, 也就是无毛细管阻力, 油珠可以顺利上浮。D 处油珠上界面曲率半径大于下端界面曲率半径, 所以毛细管压差的方向与油珠上浮方向一致, 此时毛细管的压差不但不是阻力, 而且还是驱使油珠上浮的附加动力。但是这种动力只能加速油珠在 D 处的上浮, 而不能导致去克服其它处的毛细管阻力。因此, 在当运移通道上存在着大小不同的阻力时, 只能以最大毛细管阻力来代表通道上的阻力。

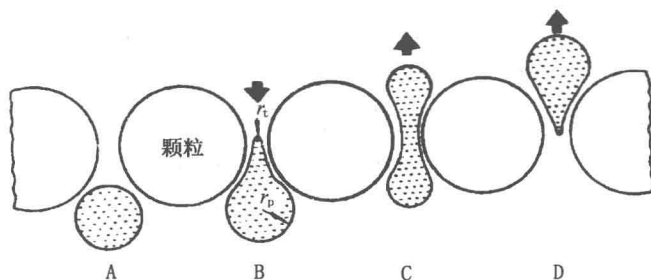


图 1—2 油体在储层中运移的毛细管阻力 (据 Berg, 1975)

6. 质量扩散力

关于油气在储层中的二次运移与聚集中的机制, 目前, 普遍接受的观点是: 油气沿储层的运动以及后来油气藏的形成主要受三种动力因素控制, 即水饱和和孔隙岩体中油气的浮力、

毛细管压力和流体的水动力。在这三种力的作用下，油滴（或气泡）的平衡条件可表示为

$$2\delta(1/r_t - 1/r_p) = z_o \cdot g(\rho_w - \rho_o) + z_o m$$

式中 δ ——油水界面上的张力；

r_t ——岩石的孔隙半径；

r_p ——岩石的喉道半径；

z_o ——油珠高度；

g ——自由落体加速度；

ρ_o ——油的密度；

ρ_w ——水的密度；

m ——水动力梯度。

В.И.Иванников (1995) 依据计算和实验所得到的浮力、毛细管力和水动力这三种力的比值证明：在天然条件下，这三种力不足以实现油气（特别是石油）的游离相运移，而质量扩散—机理渗透搬运是导致多孔地层中毛细管油移动的真正动力。

В.И.Иванников (1995) 根据实验得出两个结论：①在实验条件下，油滴和气泡在饱含水砂岩（其颗粒大小是油气藏所特有的）中不会浮起；②在实验条件下，不能强使油滴和气泡通过饱和水的具有天然储集岩所特有的粒度和渗透率的砂岩（该天然储集岩是在有如油田速度和压力梯度的承压流作用下）。因此有必要引入另一个真正的力，它能促使油滴在渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、有效粒径（砂岩储层）平均值为 $0.1 \sim 0.2 \text{mm}$ 的孔隙层系中移动。这种力被视为扩散—渗透质量传递的新方式。

储层范围内总的承压流决定了控制水溶液中各成分扩散方向和油气运动方向的力场，即侧向运移条件下的运动矢量。

占据孔隙空间微孔的实际物理容积的油滴和气泡将驱替出等容积的液体（水），其中含有被溶解的电解质（盐）。电解质呈离子状态，并且由于相界面存在电子力和分子力（在岩石矿物骨架和孔隙溶液之间），使其在微孔中分布不均匀，其中阳离子集中于表层，形成由吸附阳离子和扩散阳离子组成的双电子层。同时，微孔内部（中央部位）阴离子略有过剩，但是，总电荷完全处于平衡状态，以保证孔隙溶液在静止条件下的电中性。

如图 1—3 所示，油滴（或气泡）进入微孔 1 时，主要含阴离子的水被驱入相邻的微孔 2，结果微孔 2 的总电荷浓度增加，因此，电解质的电荷产生瞬时分离，导致薄膜水运动，并携带着油滴（或气泡）由微孔 1 移向微孔 2。然后类似的过程朝压力梯度下降的方向继续进行。

当然，因为油滴（或气泡）从一个微孔移向另一个微孔的同时也将电解质带出，所以借助它实现移动油滴（或气泡）。由此得出结论，运移前油滴所在的微孔中的电解质浓度急剧降低。因此，随着油滴的移动而进行着溶解成分的扩散作用。

这样，在油滴运移的前缘盐度应该很高，而后

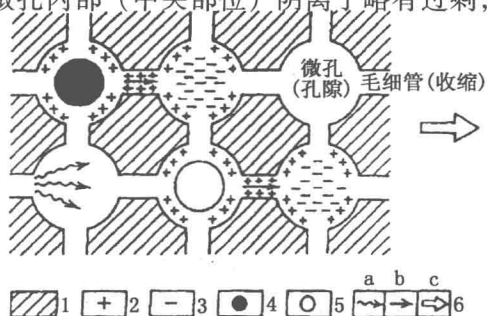


图 1—3 储层基质模型和烃相运移示意图
(В.И.Иванников, 1995)

1—岩石矿物骨架；2—阳离子；

3—阴离子；4—油滴；

5—气泡；6—方向；

a—溶于水中盐的扩散方向，b—烃相的移动方向，c—烃相移动总过程的方向

部则很低。故应将这一现象作为证明储油层移动烃类的扩散—渗透机理正确性的有力证据来评价。这样可以解释油气藏下面的高矿化度水的成因。

渗透作用作为一种力，比水动力压头和重力的浮力加在一起至少超出一个数量级，在油气运移过程中这两种力一直被当作主要推动力。

所描述的油滴和气泡的运动机理能够在漫长的地质时期确保油气从辽阔区域聚拢并在有利于烃类聚集的局部构造中集中。然后，在圈闭中进行离析作用：即油、气、水分离，因为浮力效应在此开始起主导作用。

石油运移不留痕迹这一事实可作为烃类扩散—渗透运移的正确性的另一个证据。此外，储油层内和储油层外运移条件下均未能发现石油成分有规律性的变化。这一切都表明，油滴与周围孔隙水呈稳定接触状态，并随之一起运动。

目前，在研究油气二次运移过程中的受力分析时，往往只注重浮力、水动力和毛细管力这三种力，而对其它几种力的重视程度还不够，而且对它们的作用在多数情况下也仅限于定性的描述，很少进行定量研究。

二、静水条件下的油气二次运移和聚集

为了方便起见，假设储层是均质的、充满水的亲水介质，其上为盖层所封闭，其下为生油层。

进入储层而转变为游离相的油气，由于所受浮力不足以克服毛细管力，开始在储层底部或某一部分聚集。当不断汇集并逐渐形成连片的油（气）体，所受浮力超过其最大连通喉道的毛细管阻力后，油体开始上浮。油体开始上浮的临界高度可表示为

$$Z_o = 2\delta \frac{\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}}{(\rho_w - \rho_o)g}$$

式中 Z_o ——油体开始上浮的临界高度，m；

δ ——油水界面张力，Pa；

r_t ——储层的喉道半径，m；

r_p ——储层的孔隙半径，m；

ρ_w ——水的密度，kg/m³；

ρ_o ——油的密度，kg/m³；

g ——重力加速度，9.8m/s²。

当最高油体高过临界高度 Z_o 时，就会脱离界面而上浮，在上浮过程中由于滞后效应的影响，使得上浮油体前端相对渗透率大于尾端的相对渗透率，使油体尾端越来越细，最后脱离油体而残留下来，等待着被下一个上浮油体所收容。

当油体上浮运移到储层顶部时，由于盖层封闭作用导致油气沿顶界面散开，当再次聚集到临界高度时，便沿储层上倾方向运移。此时的临界高度用公式可表示为

$$L_o = 2\delta \frac{\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}}{(\rho_w - \rho_o)g \cdot \sin\theta}$$

式中 L_o ——油体沿上倾方向运移的临界高度, m;

θ ——储层的倾角, 度。

三、动水条件下的油气二次运移和聚集

在实际情况下, 储层大多都处在动水条件下, 动水条件下油气的二次运移将取决于浮力和水动力的相对大小和方向 (李明诚, 1994)。

1. 游离相烃类的二次运移

(1) 水动力方向与浮力方向平行

水动力方向与浮力方向平行时, 水动力的方向可以垂直向上, 也可以垂直向下。当油体在水中静止时可用方程表示为

$$Z_o(\rho_w - \rho_o)g + \frac{dh}{dZ}Z_o = 2\delta\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}\right)$$

式中 Z_o ——油体运移的临界高度, m;

δ ——界面张力, N/m;

r_p ——孔隙半径, m;

r_t ——喉道半径, m;

dh/dZ ——垂直方向的水势梯度。

当水动力方向向上时, dh/dZ 取正值, 从而降低油柱的临界运移高度; 当水动力方向向下时, dh/dZ 取负值, 增加油柱的临界运移高度。

(2) 水动力方向与浮力方向垂直

在水平储层中, 当油体运移至顶面而受盖层封闭时, 油体便主要靠水平方向的水动力驱动, 当水动力大于毛细管阻力时, 油气将沿水动力方向在储层中运移。此时用方程表示为

$$\frac{dh}{dL} \cdot L = 2\delta\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}\right)$$

式中 dh/dL ——水平方向的水势梯度;

L ——水平方向上连续油体的长度, m。

(3) 水动力方向与浮力方向斜交

在实际地质环境中, 整个储层或同一储层的不同部位大多是倾斜的, 因此水动力方向与浮力方向斜交这种情况是一种最常见和最重要的状态。

如图 1—4 所示, 水动力条件下油气运移的临界高度可用公式表示为

$$Z_o = \frac{2\delta\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}\right)}{(\rho_w - \rho_o)g} - \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_o} \frac{dh}{dX}X$$

dh/dX 为沿储层倾斜方向的水势梯度, 当水动

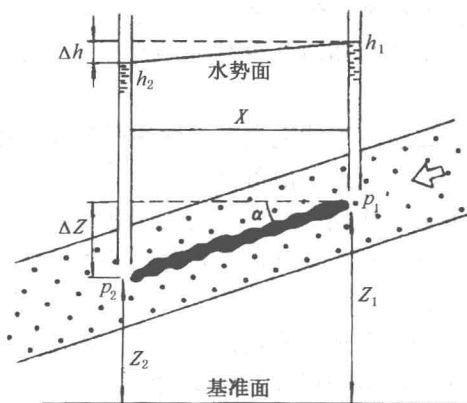


图 1—4 在储层中水动力对油气运移的影响 (据 Berg, 1975)