



石油高等教育“十二五”规划教材

海洋石油开采工程

• 田 冷 主编 •



石油高等教育教

2. 目次

第一章 绪论

第一节 海洋石油工程的发展概况

第二节 海洋石油工程的特点

第三节 海洋石油工程的环境影响

参考文献

海洋石油开采工程

田 冷 主编

石油工业出版社

田 冷 主编

本书从海洋石油地质与开发工程

入手，系统介绍了海洋石油工程

的各个环节，包括地质、工程、

环境、经济等方面，可作为石油

工程专业的教材，也可供从事

海洋石油工程工作的工程技术人员

参考。

常州大学图书馆
藏书章

图书在版编目(CIP)数据

海洋石油开采工程 / 田冷主编. — 东营: 中国石
油大学出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-5636-4608-1

I. ①海… II. ①田… III. ①海上油气田—石油开采
IV. ①TE53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 032771 号

石油高等教育教材出版基金资助出版

书 名: 海洋石油开采工程

作 者: 田 冷

责任编辑: 穆丽娜(电话 0532—86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

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: 山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 86983437)

开 本: 185 mm × 260 mm 印张: 20.75 字数: 505 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 52.00 元



前言

PREFACE

自渤海海1井投产以来,我国海上采油已经发展了近五十年,特别是随着陆上石油资源锐减与开发难度加大等矛盾日益突出,海洋石油开发显得尤为重要,并且得到了快速的发展。为了适应目前我国海洋石油工业的发展和石油高等教育改革的要求,根据石油高等教育教材建设规划和海洋油气工程专业教学计划,中国石油大学(北京)针对海洋油气工程专业本科教学编写了《海洋石油开采工程》。

本教材从海洋石油地质与开发基础出发,将海洋生产系统、开采方式、开发动态监测、注水与储层改造、油气水处理及集输、提高采收率技术等有机结合起来,突出海洋油气田开发过程的完整性与先进性,使学生系统掌握海洋油气田开采与油气集输的专业知识,为将来从事海洋油气开采的技术研发与生产管理等工作奠定基础。

本教材的特点主要有两个方面:第一,基于石油地质及开发基础知识介绍,建立系统完整的海洋石油开采过程,有助于学生理解与掌握;第二,注重各部分内容间的衔接,加强与相关学科的交叉,并辅以大量的矿场实例,体现了教材的实用性。因此,本教材不仅可做为高等学校本科课程的教材,也可以供从事海洋石油开发技术研究和矿场生产的科技人员、技术人员和生产人员参考。

本教材由田冷执笔,张红玲、刘慧卿审阅。在教材编写过程中,得到了中国石油大学(北京)石油工程学院的大力支持,在此表示真诚的谢意!

由于编者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,敬请使用本教材的师生及读者批评指正。

作者

2014年11月



目录 Contents

第一章 海洋石油地质与开发基础	1
第一节 海洋石油地质基础	1
第二节 储层岩石流体性质	10
第三节 海洋石油开发基础	26
习题	41
参考文献	42
第二章 海洋生产系统	43
第一节 生产系统概述	43
第二节 平台生产系统	45
第三节 水下生产系统	62
第四节 潜水器	73
习题	83
参考文献	83
第三章 海洋油气开采方式	84
第一节 自喷与气举采油	84
第二节 电潜泵与螺杆泵采油	106
第三节 水力射流泵与水力活塞泵采油	119
第四节 气田开采与生产管理	128
习题	136
参考文献	136
第四章 海上油田开发动态监测	138
第一节 概 述	138
第二节 压力温度测试	140
第三节 海上延长测试	150
第四节 海上油田生产测试	155
习题	160
参考文献	160

第五章 注水与储层改造	162
第一节 概 述	162
第二节 注 水	164
第三节 酸 化	178
第四节 水力压裂	193
第五节 注水与储层改造工艺优化实例	210
习题	222
参考文献	222
第六章 海洋油气水处理系统	223
第一节 概 述	223
第二节 原油处理系统	224
第三节 水处理系统	247
第四节 天然气处理系统	257
习题	268
参考文献	268
第七章 海洋油气集输	269
第一节 概 述	269
第二节 海上储油与装油系统	272
第三节 海上油气集输方式	281
第四节 海底管道与管缆	283
第五节 陆上终端	291
习题	300
参考文献	300
第八章 海洋油气提高采收率技术	302
第一节 概 述	302
第二节 化学驱	305
第三节 气混相驱	314
第四节 微生物驱	321
习题	326
参考文献	326

第一章

海洋石油地质与开发基础

第一节 海洋石油地质基础

目前,人们对陆上石油地质状况认识已较为清楚,并将对陆上石油地质的认识应用到海洋油气开发中,取得了一定的成果,然而海洋石油地质与陆上石油地质并不完全相同。海洋石油开采是在海洋这一特殊的地理环境中进行的,由于不同于陆地的地质条件,其油气分布具有独特性,因此本节除介绍石油地质基础知识以外,还以我国海洋油气地质为例介绍海洋油气地质。

一、石油地质基本概念

1. 石油和天然气的成因

海洋石油与陆地石油具有相似的成因,由于地壳的变动,以前的陆地下降变为海洋,原来是海洋的地方上升成为陆地,因此,石油的成因并不会因为当前是海洋或陆地而有明显的差异。

石油和天然气的成因是石油地质学界的主要研究对象之一,也是自然科学领域中争论较多的一个重大研究课题。

对石油成因的认识,基本上可归纳为两大学派,即无机生成学派和有机生成学派。到目前为止,虽然争论还在继续,但从指导石油勘探实践来看,无机学说提不出确切的内容,理论上也欠完整;多数人认为,自然界确实有无机合成的烃类存在,但是地壳上大规模的石油聚集却是有机成因的。

(1) 世界上已经发现的油、气田有 99.9% 分布在沉积岩中。

(2) 从前寒武纪至第四纪更新世的各时代岩层中都找到了石油,并且同煤、油页岩等可燃有机矿产的时代分布有一定关系。

(3) 在近代海相、湖相沉积中发现了有机物质转化为油气的过程,而且这个过程至今仍在进行着。

(4) 世界上既没有化学成分完全相同的两种石油,也没有成分相差甚远的石油。石油成分相似性是主要的,这说明它们的成因可能大致相同,而它们在成分上的差异则可能与原始生油物质、生成环境以及油气生成后的经历有关。

(5) 由大量油田测试结果可知,油层温度很少超过 100 °C,有些深部油层温度也只高达

141℃。石油中含有卟啉化合物、旋光性等低温下才存在的物质和现象,证明石油是在低温条件下生成的。

(6) 石油中的某些化合物明显来自动植物机体,如卟啉化合物等。同时,石油的碳同位素组成与动植物或生物成因的物质相似,而非生物成因的物质差别较大。

(7) 石油的分布与一定的沉积岩相带有关,不仅与储集相带有关,而且与生油相带关系更为密切,并且在致密石灰岩晶洞内、化石的体腔内以及被泥岩封闭的砂岩透镜体内都发现有石油及沥青物质。

上述事实的存在大大促进了石油有机生成理论的发展。

2. 生油层的岩性、岩相特征

按石油有机生成学说,自然界中富含有机质并完成了生油过程的岩层统称为生油层。在一定地质时期内,具有相同岩性、岩相特征的若干生油层与其间非生油层的组合称为生油层系。沉积盆地内某一生油层系分布的区域称为“油源区”。

1) 生油层的岩石类型

岩石类型可反映沉积环境。生油层常为海相或陆相的细粒沉积物,其岩石类型主要有暗色泥质岩类和碳酸盐岩类两种。暗色泥质岩类包括泥岩、页岩、油页岩和粉砂质泥岩等,这些岩石是在较为宁静的沉积环境中形成的,它有利于生物的大量繁殖,也有利于有机物质的保存和向石油方向的转化;碳酸盐岩类有生物灰岩、礁块灰岩、暗色隐晶质灰岩、泥灰岩及白云岩等,其中以生物灰岩和泥灰岩对生油最为有利。

2) 生油层颜色

生油层的颜色一般较深,多呈灰绿色、深灰绿色、深灰色、灰褐色和灰黑色。这些颜色的形成与岩石中含有 $\text{FeS}_2 \cdot \text{Fe}(\text{OH})_2$ 和有机物质有关,通常是还原环境的标志。

3) 含指相矿物

生油层常常含有原生指相矿物,如菱铁矿、黄铁矿等。

4) 地球化学指标

(1) 有机质丰度指标。有机质是油、气生成的物质基础,因此地层中有机质的丰富程度,即有机质丰度是表明该地层能否生成油、气的重要标志。

(2) 成熟度指标。有机质在温度、压力等因素作用下演化到能大量生成油、气的过程称为成熟过程。反映油、气成熟过程的各种指标称为成熟度指标。

(3) 转化指标。岩石中呈分散状态的沥青物质是有机质向油、气转化的产物,也是油、气运移以后残留的重质组分。它的存在是岩石有油、气生成的物证,在一定程度上反映了有机质向油、气转化的程度。

(4) 环境指标。能够说明沉积物形成过程中环境的氧化-还原强度的指标称为环境指标。

3. 储集层和盖层

凡具有使流体储存和渗滤能力的岩层统称为储集层。储集层之所以能够储集油、气,是因为它具备两个主要的性质,即孔隙性和渗透性。孔隙性的高低决定油、气的储量,渗透性的优劣则影响油、气的产量。无论是沉积岩还是岩浆岩或变质岩,只要具备一定的孔隙性和渗透性以及有效的盖层,就可以储存油、气,成为储集层。

1) 储集层的主要类型

地壳中的岩石类型很多,各类岩石只要具备一定的孔隙性和渗透性,都可成为储集层。一般按岩石类型把储集层分为碎屑岩类、碳酸盐岩类和其他岩类三种。据统计,碎屑岩类储集层和碳酸盐岩类储集层中的石油储量分别约占世界石油总储量的一半,产量分别约占40%和60%;而其他岩类如泥岩、变质岩、岩浆岩等储集层产出的原油所占比例甚小,不到1%。

2) 盖层

盖层是指位于储集层之上的渗透性很差、可封隔油气向上逸散的保护层。盖层条件的好坏直接影响油、气在地层中的聚集和保存。

目前,常见的盖层岩性类型有泥岩、页岩、盐岩、石膏和硬石膏等。在构造变动微弱的地区,致密的泥灰岩、石灰岩、白云岩也可作为良好的盖层。泥质岩盖层常与碎屑岩类储集层伴生,而盐岩、石膏等盖层多与碳酸盐岩储集层共存。

3) 生储盖组合类型

在地层剖面中,紧密相邻的包括生油层、储集层、盖层的有规律的组合称为生储盖组合。

根据生、储、盖三者在时间上和空间上的相互关系,可将生储盖组合划分成四种类型(图1-1-1)。

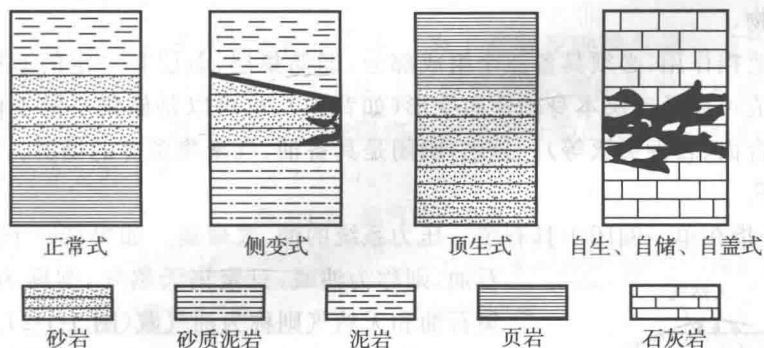


图 1-1-1 生储盖组合类型示意图

(1) 正常式生储盖组合:在地层剖面上生储盖层表现为由下而上的正常分布关系,即生油层位于组合下部,储集层位于中部,盖层位于上部。

(2) 侧变式生储盖组合:同一岩层出于横向变化而形成的生储盖组合,是岩性变化较大地区的主要组合类型。

(3) 顶生式生储盖组合:生油层与盖层同属一层,而储集层位于其下的组合类型。

(4) 自生、自储、自盖式生储盖组合:石灰岩中局部裂缝发育段储油、泥岩中的砂岩透镜体储油和一些泥岩中的裂缝发育段储油都属于这种组合类型,其最大的特点是生油层、储集层和盖层属同一层。

4. 石油和天然气的运移

石油和天然气生成后呈分散状态存在于生油层中,必须经过由分散到集中的运移过程,才能使油、气在储集层中聚集成油、气藏。在各种地质因素的作用下,石油和天然气在地壳内的任何移动都称为油、气的运移。

油、气之所以能够运移,除油、气本身是流体,具有流动性这一内在因素外,还必须

造成油、气运移的外部条件,即促使油、气运移的外部力量,包括压力、构造运动力、水动力、浮力、毛细管力以及其他作用力。这些动力因素在油、气运移的两个阶段(初次运移和二次运移)所起的作用有主次之分,即不是同时一起发挥同样的作用。油、气运移是从油、气生成到油、气藏形成整个过程中的一个重要环节。油、气在地下岩层中往往呈液态、气态和分子或分子团状态进行运移,它们既可通过岩石通道流动,也可透过其他物质进行分子运动,其运动方式主要有渗滤和扩散。

处于分散状态的已经形成的油、气,在各种动力因素作用下,随生油层固结成岩而被运移到储集层的过程称为油、气的初次运移。油、气进入储集层之后的一切运移都称为二次运移。二次运移是初次运移的继续。通过初次运移的油、气进入储集层以后,由于温度、压力条件的改变,将从水中释放出来,而呈游离态。游离态的油、气在储集层或其他通道中运移的主要动力是浮力、水动力、毛细管力和构造运动力。由于这些动力因素的影响,油、气将逐渐运移,并在适当的场所聚集成油、气藏。

5. 圈闭和油、气藏类型

1) 圈闭

运移着的石油和天然气如果遇到阻止其继续前进的遮挡物,则停止运移,并在那里聚集成油、气藏,将适合于油、气聚集成油、气藏的场所称为圈闭。圈闭的实质是一种地质因素造成的遮挡物。

圈闭要起遮挡作用,必须具备三个组成部分,即储集层、盖层和一定的遮挡(或封闭)条件。遮挡的构成可以是盖层本身的弯曲变形(如背斜),也可以是储集层沿上倾方向被遮挡(如断层、不整合面、岩性尖灭等)。总之,圈闭是具备油、气聚集条件的场所。

2) 油、气藏

油、气藏是指在单一圈闭中具有统一压力系统的油、气聚集。如果在一个圈闭中只聚集石油,则称为油藏;只聚集天然气,则称为气藏;同时聚集石油和天然气则称为油气藏(图 1-1-2)。



图 1-1-2 油气藏示意图

在一个沉积盆地内形成油、气藏需要具备“生、储、盖、圈、运、保”六个条件,其中控制油、气藏形成最基本的条件是“生、圈、运”,这些条件受许多因素的影响,而各种因素又因地质条件不同而异。因此,油、气藏的形成是该

盆地长期的地质历史发展的结果。从油、气大量生成,经过运移、聚集,最终形成油、气藏的过程,是一个连续的、统一的完整过程,如果在这个过程中缺少其中的任何一个环节,油、气藏就不可能形成。

一般情况下,油、气的上部被不渗透岩层(盖层)所遮挡,底部则被地层水所浮托。油、气、水在油气藏内按密度的不同有规律地分布。因而在油气藏水平投影图上,油、气、水具有明显的分界线(图 1-1-3)。

含油边缘:水和油的外部分界线,在此线以外没有油只有水。

含水边缘:水和油的内部分界线,在此线以内为纯含油区,此线以外、含油边缘以内油、水都可见到。

气顶边缘:天然气分布的界线。如油藏中无游离气则无气顶。

边水:地层较陡或厚度较小时,含水边缘以外的水。

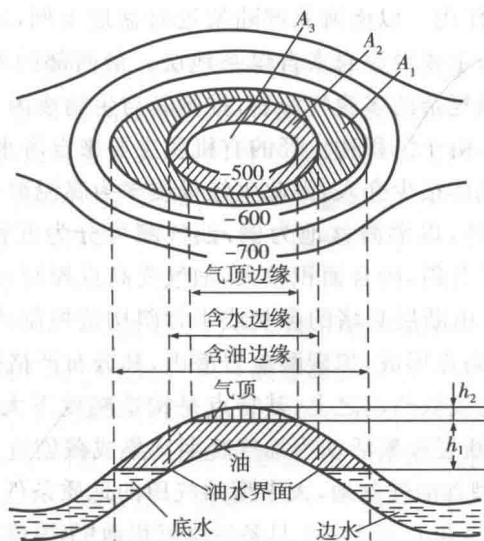


图 1-1-3 背斜油气藏简图

A_1 —含油面积; A_2 —纯含油面积; A_3 —含气面积; h_1 —含油高度; h_2 —含气高度

底水:地层较平缓或厚度较大时,油水界面以下的水。

3) 油气藏的基本类型

不同的地质条件可形成不同类型的油气藏。为了充分反映油气藏的成因、特征和分布规律,需对油气藏进行分类。由于圈闭是形成油气藏的基础,圈闭类型和形成条件决定着油气藏的形成条件及其特征。因此,以圈闭成因作为油气藏分类的基础,一般将油气藏分为四个基本类型,每类分为若干个亚类(表 1-1-1)。

表 1-1-1 油气藏分类表

构造油气藏	地层油气藏	岩性油气藏	混合型油气藏
背斜油气藏	地层不整合油气藏	透镜体油气藏	古潜山油气藏
断层油气藏	地层超覆油气藏	岩性尖灭油气藏	生物礁-构造油气藏
		河床砂岩体油气藏	裂缝-构造油气藏
		生物礁块油气藏	盐丘型油气藏

二、中国海洋油气地质

1. 中国海洋油气成藏地质条件

中国海洋石油与天然气可分陆相成因和海相成因,并以前者为主。近海盆地的陆相油气藏具有独特的地质环境。由于盆地地处大陆活动边缘,盆地在稳定发展时期所形成的深湖或半深湖中,除有水生浮游生物和藻类以外,从陆上通过河流和其他途径输入的陆源动植物残体较多,在还原环境和快速埋藏条件下,除深湖区沉积中心产生的干酪根主要是腐泥型外,大多数是混合型,斜坡边缘区属腐殖型。当大陆边缘活动加剧时,湖盆水位出现时高时低的环境变迁,频繁出现沼泽化沉积,并在特定地质条件下,湖泊与沼泽多期交替叠加沉积,使产生的多源油气运移到圈闭构造富集成藏。实践证明,多数高产井都能油、气共出。

以东海西湖凹陷为例,富产天然气的主要原因是盆地沼泽化程度高,广泛发育的沼泽相

煤系地层气源岩发挥重要作用。以南海北部陆架近海盆地为例,琼东南盆地曾经历过多期持续性的沼泽化沉积环境,主要烃源岩来自煤系地层。最西部的莺歌海盆地成气成藏地质条件更具特殊性,出现成因复杂的多源气源岩,推测其与生物成因有密切关系。

近海盆地海相生油气,由于沉积物生烃的有机质主要来自海水中的浮游生物和藻类,除边缘地区外,陆源有机质残体很少介入,因此生烃母质多为腐泥型干酪根。

对于海相成烃成藏条件,以渤海盆地为例,油气藏可分为五种类型:①背斜构造油气藏,包括逆牵引背斜和挤压背斜,闭合面积较大,油气受高点控制;②断块油气藏,依靠断层封堵油气;③断鼻油气藏,由断层封堵的鼻状或半背斜构造控制的油气藏;④潜山油气藏,由不同的基底岩层古地貌高点形成,如碳酸盐岩潜山,其分布严格受主断裂控制;⑤潜山披覆背斜油气藏,分布在凸起或低凸起之上,其特点是构造幅度下大上小,油气藏严格受构造控制,如埕北油田,而郑庐断裂频繁活动为油气晚期富集成藏创造了极其有利的地质条件。

根据我国近海五个大型含油气盆地,大中型油气田的地质条件有如下基本规律:①具备大型沉积地层,面积一般在 5 km^2 以上;②具备巨厚沉积地层,厚度在 $1\sim 2\text{ m}$ 之间;③具备有利相带,如深湖或半深湖相、沼泽相和海相;④具备配置良好的生储盖组合,要求有高孔渗储层,如三角洲砂体、海进砂和生物礁以及封闭严密的盖层;⑤具备大型二级构造带和烃源丰富的凹陷,尤其是“凹中隆”或“凹围隆”的区域背景下的构造和圈闭。

以不同成盆期的叠置关系及生油条件作为盆地含油气远景评价的基础条件,将盆地分为最好、很好、良好、一般、较差五级。

浙东及南海琼珠海盆:中白垩—古新世、始新世、渐新一中新世三期盆地均发育较好的生油岩,其叠置关系分别为复合式、镶嵌式及披盖式;具有多个面积大、厚度大的良好生油凹陷,是含油气远景最好的盆地。

渤海陆盆:始新世、渐新一中新世两期盆地发育有较厚的生油岩,叠置关系为披盖式,两期盆地生油中心吻合,具有几个良好的生油凹陷,是含油气远景很好的盆地。

莺歌海海盆、台湾西南海盆:具多期生油,存在良好的生油凹陷,推测为含油气远景很好的盆地。

北部湾海盆:虽只有始新统生油岩,但厚度大,有机质丰度高,有几个良好的生油凹陷,是含油气远景良好的盆地。

长钱陆盆:虽有中白垩—古新统、始新统两套生油岩,但生油指标不高,后期破坏较大,仅有几个生油凹陷,是含油气远景一般的盆地。

南黄海北部陆盆及南部陆盆:虽然三期盆地均发育生油岩,但盆地叠置关系为交错式,始新世原型槽盆已不完整,主要生油岩遭受较大剥蚀,且生油凹陷面积较小,厚度亦不大,是含油气远景一般的盆地。

北黄海陆盆:只有中白垩—古新统具有生油岩,面积小、厚度薄、埋深浅,是含油气远景较差的盆地。

2. 近海盆地地质特征

中国东南大陆边缘的海域沉积盆地自北向南包括渤海、北黄海、南黄海、东海陆架、冲绳海槽、台湾海峡—台西、台西南和南海北部的珠江口、北部湾、莺歌海、琼东南以及南沙海域诸盆地,总面积约为 $1.05\times 10^6\text{ km}^2$ 。

近海盆地形成于中生代时期,发育在华北、扬子和华南三个不同大地构造单元上。

1) 盆地基底

渤海湾盆地和北黄海盆地基底同属于华北地台,最早约在太古代就已存在,在渤海曾钻遇晚太古代混合花岗岩。南黄海盆地基底属下扬子地台,形成于早元古代,曾钻遇前震旦系。东海陆架盆地基底以浙、闽褶皱系为主,曾在南部灵峰一井钻遇早元古代晚期的古老变质岩系,测定为距今1 680 Ma。南海北部珠江口盆地等基底以华南地块为主体。以上各地基底在印支—燕山期均因不同程度的岩浆岩侵入而复杂化。

2) 盆地构造

中国大陆边缘构造从东亚—东南亚历经多次重大地质事件而形成多极格局。由于受控于不同的大地构造单元,其大陆边缘具有明显的分段性特点。在渤海、黄海区域,印支运动前后,华北地台与下扬子地台碰撞拼合,其结果为介于其间的古生代地槽沉降带隆起褶皱成山,形成了横贯朝鲜中部和中国胶辽地块间的临津江造山带—黄海千里岩造山带—胶北造山带(布格重力具有明显的纬向异常带),后被郯庐断裂切断,受下扬子苏鲁地块大规模向北推覆,而与秦岭大别造山带断开。东海盆地受沟—弧—盆体系控制,出现了南北分块、东西分带的构造格局。南海北部因受南海两次扩张而出现南北分带、东西分块的构造演化分异。近海盆地成盆及其随后的改造自始至终均受到大陆边缘强烈活动的影响而控制盆地沉积和油气,对成烃、成藏产生重大影响。

3) 盆地类型

中国海域及邻区有21个沉积盆地,其中大部分发育在大陆边缘(表1-1-2),除少数盆地外,多数经油气勘探证实或在远景评价上确认为含油气盆地。

表 1-1-2 21 个主要沉积盆地

海 域	盆地名称
黄海、渤海	渤海湾盆地、北黄海盆地、南黄海北部盆地(中黄海盆地)、苏北-南黄海盆地(南黄海盆地)
东 海	东海陆架盆地、冲绳海槽盆地、台湾海峡-台西盆地
南 海	台西南盆地、珠江口盆地、琼东南盆地、莺歌海盆地、北部湾盆地、笔架南盆地、万安盆地、北康盆地、南薇盆地、马来盆地、曾母盆地、文莱-沙巴盆地、礼乐盆地、西北巴拉望盆地

综观上述21个沉积盆地,按盆地结构的不同以及成因上的差异,大体上可分为8种盆地类型(表1-1-3)。

表 1-1-3 中国海域主要盆地类型划分

盆地类型	盆地划分
陆内裂谷盆地	渤海湾盆地、北黄海盆地、中黄海盆地、南黄海盆地、北部湾盆地
陆缘裂谷盆地	东海陆架盆地、台湾海峡-台西盆地、台西南盆地、珠江口盆地、琼东南盆地
走滑拉张盆地	莺歌海盆地、万安盆地、马来盆地
弧后盆地	冲绳海槽盆地
前弧盆地	文莱-沙巴盆地
前陆盆地	曾母盆地
裂离陆块盆地	北康盆地、南薇盆地、礼乐盆地、西北巴拉望盆地
深海堆积盆地	笔架南盆地

4) 盆地沉积

盆地沉积有其各自的特点。在中新生代时期,如北黄海盆地残留晚中生代陆相沉积,而东海陆架盆地南部却发育海相古新统沉积,珠江口盆地东部地震勘探资料解释发育有海相中生界沉积。南海北部陆架自中新世以来发生海侵,说明近海盆地经过多期的沉积环境变迁。在陆相沉积时期,如东海陆架盆地和南海北部诸盆地中都曾多次出现沼泽化煤系沉积。在东海南部、台西南和珠江口盆地南部包括陆坡海槽一带,中生代—古新世曾经受残留特提斯的海侵影响。但就广大近海盆地而言,古近纪和新近纪沉积仍是盆地主体。

5) 盆地油气

中国近海含油气盆地的演化与发展经历成盆—成烃—成藏三个阶段。多期构造运动,尤其是断裂活动与油气成藏关系密切,特别是新构造运动,如渤海的郯庐断裂的频繁活动形成了晚期成藏而富集的大型油气田。近海盆地油气以第三纪陆相油气为主,包括沼泽化煤成的天然气。中生代残留盆地北部海域以陆相油气为主,而南黄海等古生代地台沉积有可能发现地台型油气。除陆相油气外,海相油气将是未来勘探新领域的主要目标。预测台西南—珠江口盆地潮汕拗陷深水区的特提斯残留海相中生代沉积是寻找海相油气的主要地区。

成烃周期率,尤其是富烃周期率是衡量盆地油气富集丰度的主要指标。例如,渤海盆地之所以成为近海盆地中油气地质储量、产量最多的盆地,是因为从始新世—渐新世(沙河街组—东营组)约 35 Ma 期间就出现三次富烃周期,从而找到了多个亿吨级大型油气田。

3. 中国海域油气地质概述

1) 渤海油气地质

渤海湾盆地是一个大型的古近—新近系断陷—拗陷盆地,其面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渤海浅海、海滩地区是这个盆地的一部分,是陆上辽河、黄骅、济阳三大含油拗陷向海中的自然延伸。这个大型盆地油气资源丰富,是继大庆油田之后,在我国东部地区开发的另一个重要的含油气地区,目前陆上已形成了辽河、大港、胜利三个油区。

根据渤海浅海、海滩重力、地震、钻井资料分析,发育着 11 个生油凹陷,即下辽河的鸳鸯沟和二界沟凹陷(属辽河油田),黄班的秦南、南堡、北塘和歧口凹陷(属大港油田),济阳的埕北、桩东、青东、沾化东和车镇凹陷(属胜利油田),凹陷总面积为 $12\,716.2 \text{ km}^2$ 。按照渤海及沿岸盆地的油气生成、运移、聚积规律,每个生油凹陷就是一个油源区,就有可能在其周围发现一个含油气的聚集区。

辽河、大港、胜利油田和渤海石油公司对有关生油凹陷的生油条件进行了大量的分析化验和综合研究工作,一致认为:这些生油凹陷生油岩厚度大,暗色泥岩厚度均为 $500 \sim 1\,000 \text{ m}$,有机质丰度高,热转化条件好,油源十分丰富。这些凹陷一般都有两套生油层系,一套是沙三段,另一套是沙一段东营组下部,主力生油层系是沙三段。

陆上的 18 个二级构造带向海内自然延伸,在陆上已钻探了 17 个,在海滩、浅海部分已在 10 个构造带上进行了钻探,有 8 个获得了工业油流,构造钻探成功率达到 80%,这都说明渤海浅海、海滩找油的把握性大、风险小。

渤海湾盆地含油层系多,油藏类型多,领域广阔。在以拉张应力为主形成的渤海湾断陷盆地,油藏的圈闭类型是多样的,突出的有断块型、背斜型、潜山型、披覆型、斜坡型、超覆型以及岩性尖灭型。它们的出现往往是相互交替、互为因果,形成了许多“复式油气聚集带”,沿生油凹陷大面积分布。

2) 黄海油气地质

黄海的表层沉积物为陆源碎屑物,局部地区有残留沉积。沉积物自岸向海由粗到细呈带状分布。沿岸区以细砂为主,中间有砾石等粗碎屑物质。东部海底沉积物主要来自朝鲜半岛;西部海底沉积物为黄河和长江的早期输入物;中部深水区是泥质为主的细粒沉积物,主要是黄河输入的物质。粗、细沉积物之间有宽窄不等的粉砂质沉积。

黄海基底由前寒武系变质岩系组成。北部属于中朝 76 地台的胶辽隆起带,在古近—新近纪时基本上处于隆起背景。南黄海在新生代时经受了大规模的断陷,接受了巨厚的沉积,海域内的主体构造走向为北北东,由大致平行相间排列的隆起带与坳陷带(盆地)组成。胶辽隆起带和南黄海—苏北坳陷带构成了黄海的海底构造骨架,其东南缘经浙闽隆起带延伸入东海。这些隆起和坳陷带成为黄海陆架发育的基础和边界条件。晚近纪时期以来,黄河、长江带来丰富的泥沙,填没了构造坳陷、水下谷地、构造隆起和水下丘陵,从而形成了现在宽广、平坦的大陆架。第四纪以来,冰期、间冰期更迭交替,海面频繁升降,使大陆架多次成陆,又多次受到海侵。最后一次海侵是在距今 $2 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4$ 万年开始的。距今 6 000 年左右,海面才上升到接近现在的位置。

黄海水域的石油资源分布在南黄海和北黄海两个盆地,其地质资源量分别占 41.24% 和 58.76%,可采资源量分别占 46.06% 和 53.94%。南黄海盆地远景资源量 4.44×10^8 t,地质资源量 2.98×10^8 t,可采资源量 0.72×10^8 t;北黄海盆地远景资源量 8.02×10^8 t,地质资源量 4.24×10^8 t,可采资源量 0.85×10^8 t。

黄海水域的天然气管资源全部分布在南黄海盆地,盆地天然气远景资源量 $4\ 163.00 \times 10^8$ m³,地质资源量 $1\ 847.00 \times 10^8$ m³,可采资源量 $1\ 071.26 \times 10^8$ m³。

3) 东海油气地质

东海面积 77×10^4 km²,平均水深 72 m,但是大部分海域的水深为 60~140 m,在五岛列岛到台湾岛一线的西北基本上属大陆棚,此线东南则为大陆坡和海槽,冲绳海槽的最大深度达 2 719 m,为东海最深处。东海的海湾以杭州湾最大,流入东海的河流有长江、钱塘江、闽江及浊水溪等。中国沿海岛屿约有 60% 分布在该区,主要有台湾岛、舟山群岛、澎湖群岛、钓鱼岛等。东海东部边缘上的琉球群岛一带岛屿更多。东海大陆架是中国大陆在海水下的自然延伸,是自更新世末期中国大陆以黄河和长江为主的大陆水系冲积而成的水下三角洲平原。

东海大陆坡北宽南窄,最宽处 70 km,最窄处 28 km。大陆坡在冲绳海槽底部的转折水深自北向南逐步增大,北部 600 m,中部 1 000 m,南部 1 500~1 900 m,大陆坡最大坡度为 7°,一般为 3°。

冲绳海槽是东海的重要地理单元,其北部水深 600~800 m,南部水深超过 2 000 m(最深 2 940 m),海槽南北长 1 200 km,东西宽 90~125 km。

东海大陆架自西向东划分为浙闽隆起带、陆架坳陷盆地、陆架外缘隆起带,大陆架以东为冲绳海槽张裂盆地、琉球岛弧隆起带。

据估算,东海油田蕴含石油 250×10^8 t,相当于中国年消耗石油总量(4×10^8 t)的 60 多倍,估计拥有超过 8×10^{12} m³ 的天然气。

4) 南海油气地质

南海海底地形复杂,主要以大陆架、大陆坡和中央海盆三个部分呈环状分布。中央海盆位于南海中部偏东,大体呈扁的菱形,海底地势东北高、西南低。大陆架沿大陆边缘和岛弧

分别以不同的坡度倾向海盆中,其北部和南部面积最广。在中央海盆和周围大陆架之间是陡峭的大陆坡,分为东、南、西、北四个区,南海海盆在长期的地壳变化过程中成为深海海盆,南海诸岛就是在海盆隆起的台阶上形成的。其东沙群岛位于北部陆坡区的东沙台阶上,西沙群岛和中沙群岛则扎根于西陆坡区的西沙台阶和中沙台阶上,南沙群岛形成于南陆坡区的南沙台阶上。

南海北部属于我国近陆海,大致是指北纬 17° 和西沙群岛的南海海域,而且基本上没有国际争议区,油气的勘探与开发进行得较早,并且具有相当大的规模,曾一度成为中国海域的最大油气产区。值得关注的是,南海北部油气的开发正迈向深水,成为我国走向深海的窗口。

第二节 储层岩石流体性质

一、储层岩石性质

(一) 岩石的孔隙

岩石中存在许多未被固体物质充填的空间,这些空间称为岩石空隙。空隙按几何尺度可以分成孔隙、空洞和裂隙(缝)。砂岩岩石的孔隙空间主要由喉道和孔隙组成,通常把孔隙和喉道统称为孔隙(图 1-2-1)。碳酸盐岩的孔隙空间通常以裂隙、溶洞为主。

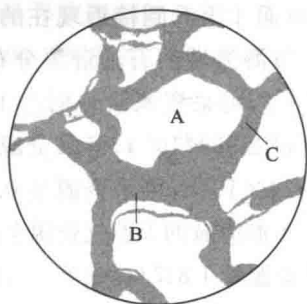


图 1-2-1 孔隙与喉道分布示意图

A—颗粒;B—孔隙;C—喉道

1. 孔隙度

油藏岩石的孔隙度是指岩石孔隙体积与其外表体积的比值。岩石的外表体积 V_f 可以分解成骨架体积 V_s 和孔隙体积 V_p , 即 $V_f = V_s + V_p$, 则油藏岩石孔隙度为:

$$\phi = \frac{V_p}{V_f} = \frac{V_p}{V_s + V_p} = \frac{V_f - V_s}{V_f} \quad (1-2-1)$$

对于正排列的情况(图 1-2-2), 设球的半径为 r , 单元立方体的边长为 $2r$, 则立方体的体积为 $V_f = (2r)^3 = 8r^3$, 单元体中有 8 个 $1/8$ 的球, 其体积为 $V_s = 8 \times \frac{1}{8} \times \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi r^3}{3}$, 则单元体孔隙度为:

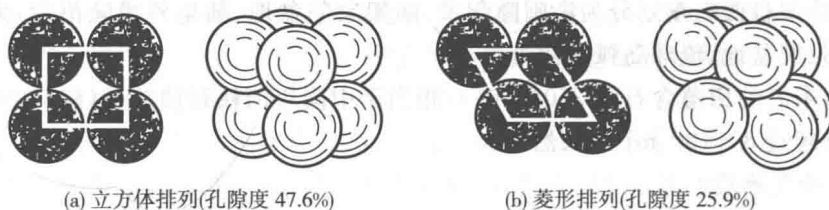


图 1-2-2 等径球形颗粒立方体排列(正排列)和菱形排列的岩石模型

$$\phi = \frac{V_p}{V_f} = \frac{V_f - V_s}{V_f} = \frac{8r^3 - \frac{4}{3}\pi r^3}{8r^3} = 1 - \frac{\pi}{6} = 47.6\%$$

2. 绝对孔隙度

绝对孔隙度是指岩石的总孔隙体积(包括连通的和不连通的)或绝对孔隙体积 V_{ap} 与岩石外表体积 V_f 的比值,以 ϕ_a 表示:

$$\phi_a = \frac{V_{ap}}{V_f} \quad (1-2-2)$$

3. 有效孔隙度

有效孔隙度是指岩石在一定压差作用下,被油、气、水饱和且连通的孔隙体积 V_{ep} 与岩石外表体积 V_f 的比值,以 ϕ_e 表示:

$$\phi_e = \frac{V_{ep}}{V_f} \quad (1-2-3)$$

上述孔隙度的关系是: $\phi_a > \phi_e$ 。这一关系是由岩石的孔隙结构决定的(图 1-2-3)。矿场资料和文献上不特别标明的孔隙度均指有效孔隙度。

砂岩的有效孔隙度范围为 15%~40%,一般为 15%~30%,碳酸盐岩石孔隙度较小,通常小于 5%。孔隙度低于 10%的油层一般很少出油。

4. 双重介质的孔隙度

含有裂缝-孔隙或溶洞-孔隙的油藏岩石称为双重孔隙介质。

双重孔隙介质含有两种孔隙类型:一类是由岩石固体颗粒之间的孔隙空间构成的粒间孔隙系统,称为基质孔隙或原生孔隙;另一类是由裂缝和孔洞形成的孔隙系统,称为裂缝孔隙或次生孔隙。

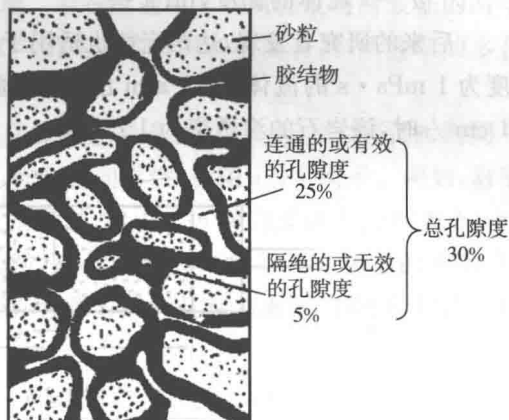


图 1-2-3 有效孔隙度和总孔隙度的关系图

基质孔隙体积与岩石外表体积的比值称为基质孔隙度;裂缝孔隙体积与岩石外表体积的比值称为裂缝孔隙度。双重介质的总孔隙度 ϕ_t 可由基质孔隙度和裂缝孔隙度相加得到:

$$\phi_t = \phi_p + \phi_f \quad (1-2-4)$$

式中 ϕ_p ——基质孔隙度;

ϕ_f ——裂缝孔隙度(孔洞孔隙度)。

实验研究表明,双重介质的裂缝孔隙度明显小于基质孔隙度。统计资料表明,当 $\phi_t < 10\%$ 时, $\phi_f < 0.1\phi_t$; 当 $\phi_t > 10\%$ 时, $\phi_f < 0.04\phi_t$; 仅当 $\phi_t < 5\%$ 时, ϕ_f 值才需要考虑。

(二) 岩石的渗透性

在一定压差作用下,岩石允许流体在孔隙中流动的性质称为渗透性。渗透率是储层岩石通过流体能力的重要量度。法国科学家达西于 1856 年公布了用水通过自制的铁管砂子滤器进行稳定流实验研究的结果(图 1-2-4)。后人把他的成果进行归纳和推广,称之为达西