

石油开发地质学

(美) P. A. 迪基 著



7334

石油开发地质学

[美]P.A.迪基 著

甘克文 李昭仁 陈昌明 吴振鑫 译

石油工业出版社

内 容 提 要

著者P. A. 迪基是美国塔尔萨大学地质学名誉教授。本书是他为该校编写的高年级地质学教材，曾作为短期进修教程。

本书是作者的生产实践经验与理论认识的结合，有些论点是比较新颖的。全书主要介绍了石油开发地质学的基础理论，储集层特性及沉积环境分析，主要录井方法和资料解释，油气水的性质及实验室化验分析方法等。书中特别对砂岩和碳酸盐岩储集层特性，地下压力，流体特性等进行了实例研究；此外，对储集层地质学在注水和提高采收率方面的作用也进行了较深入的分析。

本书可供石油开发地质技术人员、石油地质技术人员、采油工程技术人员以及有关高等和中等专业院校师生参考。

本书前言、第一至第四章由吴振鑫同志翻译；第五、十、十一章由李昭仁同志翻译；第六至第九章由陈昌明同志翻译；第十二至十五章由甘克文同志翻译。全书由甘克文同志校订。

P. A. Dickey

Petroleum Development Geology

Division of Petroleum Publishing Co. Tulsa, Oklahoma, U. S. A.

(1979)

石油开发地质学

[美]P. A. 迪基 著

甘克文 李昭仁 陈昌明 吴振鑫 译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

化学工业出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 14印张 344千字 印1—5,000

1982年7月北京第1版 1982年7月北京第1次印刷

书号：15037·2337 定价：1.15元

前 言

自从石油工业开创以来，地质学家就作出了卓越的贡献，迄今主要侧重于发现新油气田的方法探索与应用上。因此绝大部分石油地质学家在勘探部门中工作，而一旦他们发现了油气田，便把开发工作主要留给钻井人员和石油工程师来承担。

近些年来，在油气田开发中对地质学家的需求日益迫切。储集层很少为孔隙性和渗透性均匀的岩石，褶皱成为穹窿。它们往往由狭窄的河道或海滩形成的渗透性复合砂层所组成，并且在垂向上和侧向上被不渗透的页岩所分隔。一般储集层与其说象一叠薄烤饼，倒不如说象一盘通心粉。至于碳酸盐储集层，由于次生溶解和裂缝改变了原始孔隙度而更加复杂。因此油气井的井网不应是随意决定间距的规则正方形网格，而应该根据储集层的地质特点进行设计。这样从经济上考虑，可及时确定以最少的井回收大量的油气。

在应用各种提高采收率的方法时，要求对储集层的渗透率分布情况有深刻的了解；否则昂贵的采油介质将不按预定方向流动而损耗，以致回收油量很少增加，甚至毫无所获。

本书是为美国塔尔萨 (Tulsa) 大学编写的高年级地质学教材，它曾被该校当作短期进修班教程使用。原来的目的主要是供从事石油开发工作的地质人员参考，因此对大部分开发技术特别是石油地质学问题均有所阐述。作者希望本书将是大学石油地质学课程中的一本有用的教材。通过本书，作者也期望对包括数学模拟和提高采收率设计详细研究储集层的工程师们有所裨益。因为他们需要知道所赖以工作的那些地质数据是如何获得的，而且必须把储集层作为客观世界中的存在加以具体化。

本书并不是一本参考书，主要是作为教学用书来编写的，因此没有罗列大量参考文献。虽然各章之末列出一些书目，但它并不代表所述专题的全部权威性文献，而是作为对有关例证或图解的资料提供者的感谢。

本书不是他人发表成果的摘要，而是作者自己的经验和认识，其中颇有一些新的概念和原理首次在这里提出。对于那些业已广为流传的陈旧概念或作者不同意的观点，一概从略。然而，没有一本广泛的基本教材象本书那样包含如此丰富的素材，并且试图在每一章中把所述主题的流行见解加以概括。

目 录

第一章 开发地质学的任务 1	第1节 取芯次数和位置的选定 20
第1节 开发地质学..... 1	第2节 取芯类型 20
第2节 开发地质学的应用举例..... 2	常规取芯..... 20
布伦特油田..... 2	金刚石取芯..... 20
豪金斯油田..... 3	绳索取芯..... 20
布莱特福油田..... 4	井壁取芯..... 21
第3节 影响储集层性能的一些地质因素..... 4	橡皮套取芯..... 21
第4节 储集层的形状和大小..... 6	第3节 岩芯的描述和保管 22
地层的连续性..... 6	沉积构造和结构..... 23
孔隙度的类型..... 7	第4节 岩芯分析 23
第5节 构造..... 7	孔隙度..... 23
倾角..... 7	渗透率..... 24
断层..... 7	孔隙度与渗透率间的关系..... 25
节理..... 7	流体饱和度..... 27
第6节 流体的含量..... 7	参考文献..... 27
地质储量..... 7	第四章 泥浆录井 29
隙间水饱和度..... 8	第1节 泥浆中的烃显示 29
气体含量..... 8	理论..... 29
第7节 设计符合地质条件的开发方案..... 8	捕集器..... 29
井距..... 8	泥浆中油气的检验..... 30
井网..... 8	硫化氢的检验..... 31
完井方法..... 9	检验泥浆中油气的影响因素..... 31
参考文献..... 9	泥浆录井图的解释..... 32
第二章 旋转钻井岩屑的检验 11	第2节 泥浆记录人员记录的其他钻井
第1节 历史回顾..... 11	参数..... 32
第2节 旋转钻井法..... 11	泥浆性质..... 32
第3节 样品的检验与描述..... 13	钻井速率..... 32
石油的显示..... 13	钻头承重和转盘速度..... 33
岩石类型的鉴定..... 13	泥浆循环系统..... 33
砂岩..... 13	参考文献..... 35
页岩..... 16	第五章 电测及其它电缆测井 36
碳酸盐岩..... 16	第1节 电测 36
其他岩石..... 16	自然电位..... 36
第4节 标绘录井图..... 17	电阻率..... 38
百分比录井..... 17	第2节 放射性测井 43
录井解释..... 17	自然伽玛测井..... 43
参考文献..... 19	中子测井..... 43
第三章 岩芯分析 20	密度测井..... 44

声波测井.....	45	二叠盆地.....	94
地层倾角测井.....	45	阿尔伯达盆地.....	97
校正和计算.....	48	席状碳酸盐岩.....	97
参考文献.....	50	裂缝性碳酸盐岩油田.....	98
第六章 砂岩储集层的沉积环境.....	51	第5节 碳酸盐的成岩作用.....	98
引言.....	51	第6节 碳酸盐岩的孔隙类型.....	99
第1节 密西西比河现代三角洲.....	51	第7节 碳酸盐岩储集层中的流体.....	101
第2节 其它现代河流三角洲.....	53	参考文献.....	102
第3节 碎屑沉积作用的环境.....	53	第十章 石油与天然气.....	104
冲积扇和网状河流.....	53	第1节 原油.....	104
三角洲平原.....	54	第2节 天然气.....	108
河流环境.....	55	第3节 油气的相态.....	109
海洋环境.....	56	第4节 石油的成因.....	110
三角洲边缘沉积.....	57	非储集层中的有机质.....	110
三角洲沉积的垂向堆积.....	58	形成石油的化学变化.....	111
第4节 深水沉积.....	58	第5节 油气的源岩.....	112
第5节 风成沉积.....	60	第6节 油气运移与聚集.....	117
第6节 沉积构造和结构.....	60	压实作用.....	117
第七章 不同类型砂体油田.....	62	石油的初次运移.....	117
第1节 河流砂体.....	62	石油的析出.....	118
第2节 海滩型砂体.....	64	二次运移.....	118
第3节 由几种不同类型砂体组成的油田.....	66	油浸含水砂岩.....	119
尼日尔三角洲.....	66	倾斜的油水接触面.....	120
埃尔克城油田.....	69	参考文献.....	122
参考文献.....	78	第十一章 油田水.....	123
第八章 砂岩储集层的性质.....	79	第1节 油田水的化学分析.....	123
第1节 砂岩.....	79	化学分析的目的.....	123
颗粒.....	79	第2节 油田水的化学成分.....	123
颗粒形状.....	80	成因分类.....	127
基质.....	80	化学分类.....	127
胶结物.....	80	第3节 地下水的化学成分.....	129
孔隙.....	80	原生水的化学成分.....	129
砂岩的分类.....	80	大气水的化学成分.....	132
沉积构造.....	82	第4节 地层水中溶解的有机化合物.....	136
砂岩中的粘土.....	84	溶解气.....	136
钻井泥浆对砂岩的影响.....	86	地层水的其它有机成分.....	137
钻井泥浆对页岩的影响.....	87	参考文献.....	140
参考文献.....	88	第十二章 地下压力.....	142
第九章 碳酸盐岩储集层地质学.....	89	引言.....	142
第1节 碳酸盐岩储集层中的石油.....	89	第1节 储集层压力的成因.....	142
第2节 碳酸盐岩岩石类型命名.....	89	预测气水接触面.....	145
第3节 现代碳酸盐沉积环境.....	91	第2节 低异常储集层压力.....	145
巴哈马地区.....	91	阿尔伯达省的维京砂岩.....	146
第4节 古代碳酸盐岩储集层.....	94	新墨西哥州圣胡安盆地.....	148

低压的成因.....	149	水驱.....	184
压力资料的地质应用.....	151	重力泄油(和气顶驱).....	186
第3节 水动力的方式.....	153	压实驱动.....	186
自流.....	153	原始采收率.....	186
位能面图.....	155	注气.....	186
在水动力活跃区如何找油.....	156	第4节 注水.....	187
水动力流动的圈闭作用.....	157	注水过程.....	188
第4节 异常高压.....	158	扫油效率.....	190
异常高孔隙压力的成因.....	159	储集层的不均质性.....	190
异常高压的检查.....	160	储集层不均质性的确定.....	191
电阻率.....	160	第5节 提高采收率.....	192
声速.....	161	溶剂驱.....	192
页岩密度.....	164	表面活性剂.....	192
钻进速度.....	164	乳化液.....	193
泥浆录井中的页岩气.....	165	注蒸气.....	193
温度变化.....	165	地下燃烧.....	193
地层破裂.....	165	第6节 碳酸盐岩中的储集层状态.....	194
防止井喷—处理井涌.....	167	第7节 储集层模拟.....	195
浅层高压带.....	168	参考文献.....	195
高异常压力储集层的经济价值.....	168	第十五章 储集层地质学在注水和提	
异常压力的地质意义.....	168	高采收率作业中的应用.....	197
参考文献.....	172	第1节 储集层划分为相似单位的方法.....	197
第十三章 钻柱测试.....	174	垂向划分为时间、岩石单元.....	197
第1节 钻柱测试工具.....	174	第2节 沉积环境的鉴定.....	197
第2节 钻柱测试压力记录.....	175	第3节 各个砂岩单元的制图.....	200
第3节 钻柱压力记录的解释.....	175	第4节 碳酸盐岩储集层的划分.....	206
第4节 压力恢复理论.....	176	西塞米诺尔.....	207
参考文献.....	180	金尖.....	207
第十四章 储集层中的流体状态.....	181	麋鹿盆地.....	209
第1节 岩石、油和水的毛细管性质.....	181	棉木溪.....	210
毛细管性质.....	181	布尔班克.....	210
第2节 相对渗透率.....	182	布利昂—克林顿维耳.....	213
第3节 原始生产机理.....	184	结论.....	214
溶解气驱.....	184	参考文献.....	214

第一章 开发地质学的任务

第1节 开发地质学

在第一口成功的探井钻完以后,开发地质师或生产地质师便可把他所掌握的学识和技术应用于油气田的开发中。此时他需要把油田勘探阶段所获得的各种地球物理、地质和有关工程资料,以第一口探井得出的成果重新解释,从而制订开发方案。

区域地质资料,加上从第一、二口探井中获得的样品、岩芯和电缆测井资料,使地质师有可能预测储集岩的规模、形状和侧向形式;而钻柱与层段测试则可提供储集层的各种参数,如孔隙度、渗透率、流体饱和度、油气比以及油水接触面等数据。

根据上述这些数据,可建立能预测油层动态和可采总储量的模型。这种早期的估算当然比较粗略,但却是初期决策开发方案时必不可少的。因为首先必须决定是否要进行开发,第二步才是估算油井数目、油井的大致布局以及必要的生产设备。有了油气日产量的估计数后,才可能编制出该开发方案的年度费用预算表,从而衡量开发油气田的合理投资。

为了对老油田提高采油率而进行评价时,非常需要储油层的地质资料。当为了回收剩余油而注入流体时,总希望流体能有效地驱扫储集层。整个开发计划,包括开发方法选择、井距、井网和完井实践等,必须符合储集层的地质条件。

开展油气勘查,包括地下地质和地球物理在内的广泛而耗费巨大的区域地质研究。钻普查探井要耗资数百万美元。就钻井工作者、工程师或井场地质师而言,如果对勘查成果由于不注意或掉以轻心而去冒勘探失败的风险,则是非常愚蠢的。因之很有必要对上述三种人进行一些正规的培训。

一位责任心强的勘探工作者,当钻机搬移到他所在的探区时,不会轻易地把应负的责任推卸给其他工程师。因为在制订包括泥浆比重、下套管深度以及测井、测试和强化措施等内容的钻井计划时,勘探工作者是最有资格的人选,他也是作经济预测和评价的最有发言权的人士。

本书目的是介绍开发地质师所用的一些方法。这些方法在大学中通常不教。在一般情况下,新手参加工作先是被安插到井场,这段时间使其能掌握一些钻井和完井方法。对于培养新人的实践知识,这种做法是必须的,但是另外还应授以一些原理性的指导,以补不足。为此,有些较大的石油公司就在公司内部设置了一些培训学校。本书内容既适于正规课程之用,又可作为地质师和工程师的基础知识读物。

考虑到本书所述及的许多方法随着科学技术的发展而日新月异,因之哪怕较新的技术,待到编入书中出版,势必变得陈旧。因此,本书的重点在于原理的阐述而不是实际操作。因为后者在现场向一同工作的同事以及操作手册学习要更好些。

对电缆测井解释这一主题的论述,往往需要相当多的篇幅;在正规授课时,至少要教数星期之久。不过作为一位开发地质师来说,这是不可缺少的。同样重要的是,他还必须很好地掌握储集层力学的知识。本书对这两项内容各有一章专门论述,供没有学习过这些知识的学员参考之用。这两章只能看作是不完全的概论,不能代替这方面的训练。

第 2 节 开发地质学的应用举例

要说明石油开发地质学的作用,最好以它在油田中实际应用的例子来阐明。第一个例子是布伦特 (Brent) 油田,它向我们表明如何根据第一批四口钻井的资料,就有可能设计出整个油田的开发方案,并估算出它的储量。第二个例子是豪金斯 (Hawkins) 油田,介绍了如何设计出不同的生产方法,来开采这个已有三十五年历史的老油田。第三个例子为布莱德福 (Bradford) 油田,说明如何应用详细的地质研究作二次采油作业规划。

布伦特油田 英国北海地区的布伦特油田是近年来发现几个最大的油田之一 (Kingston 和 Niko, 1975)。它于1971年被壳牌-埃索石油公司所发现,由联合王国壳牌公司经营。图 1-1 是油田发现前的地震剖面图 (Bowen, 1975)。从图中可以看出有深度为2~3秒相对未经扰动的沉积岩系。该处非常显著的高振幅反射层标志为倾斜东陡西缓的侵蚀面斜坡。其下为普遍向西倾斜的层序,它被正断层所断开。在离潜伏隆起顶部以西近1公里的倾斜下方钻了发现井 (图1-2),该井的水深142米,井位在日得兰岛东北150公里处,也是在北海地区距最近的联合王国控制井以北370公里的地方。

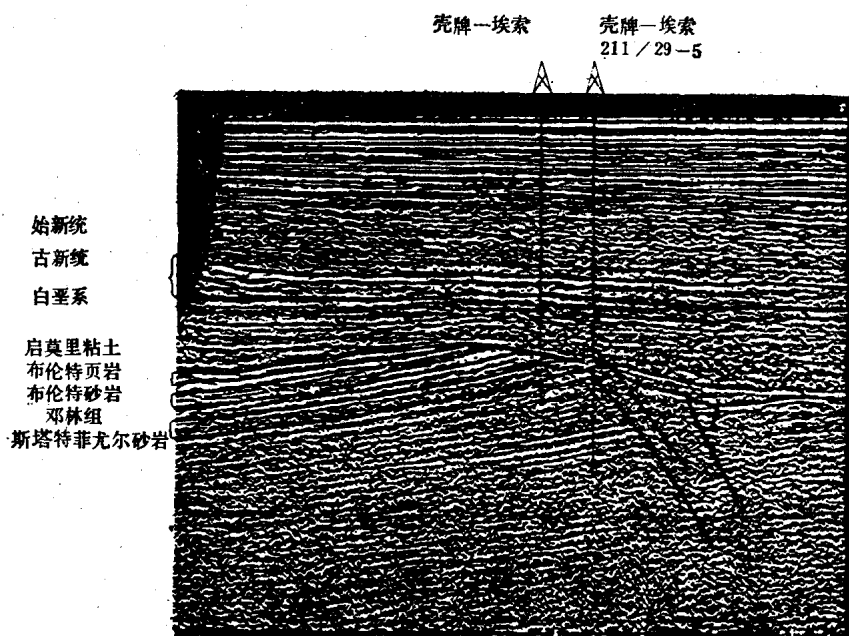


图 1-1 布伦特油田附近的地震剖面 (据 Bowen, 1975)

对未扰动沉积物比较合理的可假定为第三系或白垩系,但不整合面以下的地层年代则很不清楚——它们可能属前寒武纪,但实际证明则是侏罗纪。在不整合面之下有115米左右的黑色和灰色页岩,该页岩不整合于河成三角洲环境下沉积的侏罗系砂岩之上。在第一口井中钻到60米高的油柱;而一年年后在该构造顶部所钻的第二口井中,在所钻穿的53米井段中均发现有天然气,其下有114米的纯净油砂 (图1-2)。这两口井的油层下均见水。对第二口井的全部生产井段取了岩芯,并进行了三次生产测试。地层层段的多次测试,证明了在油水接触面处的油含有不饱和的天然气,但是向油气接触面溶解气和油的比例上升。第二口井钻进更深,发现下面有下侏罗统斯塔特菲尤尔 (Statfjord) 砂岩,在该处产水。

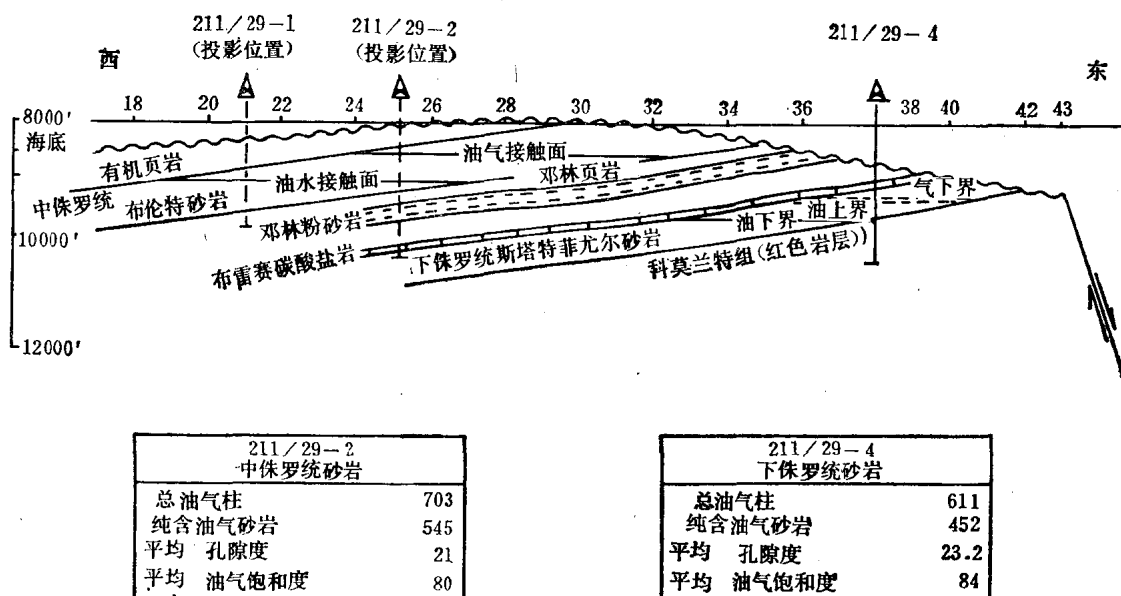


图 1-2 布伦特油田初步剖面图(据Kingston和Niko,1975)

由于布伦特油田离英国本土远,而且费用大,故有关进一步如何开发的决策必须很快决定。这包括平台和生产装置的设计,接着需要做开采方法的计划。对该油田沉积环境的地质研究,提供了砂岩体的性质、分布范围和非均质性的预测。从地震数据得知油水接触面以上油田范围的大小,储量估计约为石油10亿桶(1亿4千万吨)和天然气2万亿立方英尺(560亿立方米)。为了补偿开发所需的巨额投资,必须尽可能做到尽早出油和持续高产。因之在设计第一个平台时,计划日产原油10万桶(即1万4千吨/天),日注水20万桶(3万1千立方米/天)以及应有的天然气。

一年后即1973年,第三口井证实该油田向北延伸,而在隆起东翼的第四口井见到下侏罗统砂层含油。这样使得油藏向东伸展,增加了3亿桶(4千3百万吨)石油和1万4千亿立方英尺(400亿立方米)的天然气。不过这些新的发现,不必过多地改动原有的开发计划。

此后进行了更精细的油藏模拟研究。根据岩芯的地质分析,把储集层细分成四个沉积旋回,从而得出存在着三个分隔的储集层的结论。上、下两个沉积旋回有良好的侧向连续性,但中间(下三角洲平原)的第二和第三旋回的侧向连续性差。一项重要的问题是对天然水浸的强度仍未确定。

根据这些模型研究的结果,有可能预测出最终储量、最优生产率和储集层的动态,并且在仅仅钻了四口井的情况下,对一个有数十亿桶储量的大油气田设计出所需的生产设备。

阿拉斯加的普拉德霍湾(Prudhoe)是另一个特大油田,也是只钻了很少几口井,就推算出详细的地质数据。通过对这些研究,决定动土兴建耗资巨大的横贯阿拉斯加的输油管线(Eckelman等,1975)。

豪金斯油田 东得克萨斯州豪金斯油田是一个老油田,在对它的地质情况和过去的油层动态进行了仔细研究之后,改变了它的生产机理(King和Lee,1976)。该油田于1940年发现,至1974年所生产的石油已超过5亿桶(7千1百万吨)。在第一次开发时,对生产的白

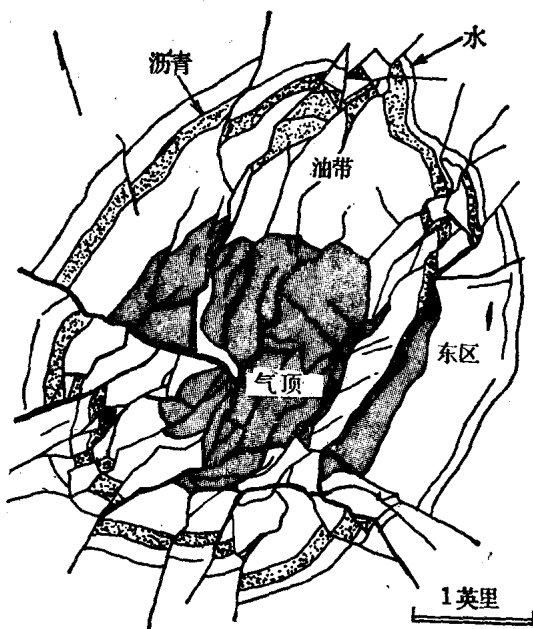


图 1-3 豪金斯油田的沥青层和断层的位置
(据King和Lee,1976)

至系伍德宾砂层取过大量岩芯,并经过深入的地质研究。豪金斯油田与1930年发现的东得克萨斯油田为同一含水层,东得克萨斯油田已经产出了大量的油和水,因此降低了压力,其影响甚至远及豪金斯油田。从豪金斯取得的岩芯显示,在该油田西区油水接触面之上有一层沥青(图1-3),它起到了压力密封的作用,因此原始储油层压力为1985磅/平方英寸(144公斤/平方厘米),而含水层的压力才1830磅/平方英寸(128公斤/平方厘米)。在南北向主断层之东,沥青密封较差,油田在强烈水驱条件下生产。

油田西区,在北部水透过沥青层形成水驱。南部则由重力驱动生产,气顶因此从北向南位移。石油在北部侵入气顶。根据1974年研究的结果,为了保持一定压力和阻止石油迁移,决定把燃烧后产生的惰性气体注入气顶,石油生产将主要靠重力驱动。用这种生产方法

估计能多采油1亿8千9百万桶(2千7百万吨)。

布莱特福油田 宾夕法尼亚州布莱特福油田发现于1871年,在初期溶解气驱时期可能已产油2亿桶(2千8百万吨)左右。它是第一个经精心考虑后利用注水以增加采油量的油田(Fettke, 1950)。当时油田经营者认识到必须对油层地质和流体动态有所了解才能进行二次采油。因之,在二十世纪三十年代宾夕法尼亚州就已奠定了有关储集层动态的现代科学基础。从砂层顶部绘制的图中可看到具背斜构造的层状砂岩。经对顿钻取样的仔细研究,发现油藏由一系列像瓦片那样叠覆的砂岩个体所组成,都是向西倾斜(图1-4)(Wilson, 1950)。试图以不同的速度把水注入不同的砂岩体中。

水力压裂能提高注水的速率,但也有扩大天然节理后使水直接流入生产井的危险。因之井网的布置,应使吸水线和生产井平行于天然裂缝系统,这样可使注入的水与人工扩大的裂缝呈90度方向推动石油。

根据对个别砂岩体的大小、形状的地质解释而拟订的二次和三次采油计划的生动例子有:科罗拉多州的朗吉莱(Rangely)(Larson, 1974);得克萨斯州的莫纳汉斯(Monahans)(Dowling, 1975)以及伊利诺斯州的卢登(Louden)(Harris, 1975)。

第3节 影响储集层性能的一些地质因素

在过去当油田还在原始机理下生产的年代,储集层的详细地质图是有用的,但也不是不可缺的。那时是根据自然条件生产石油。油田的非均质性和其他地质特性,有时帮助了有时又阻碍了石油的开采。那时,石油经营者能够确实利用这些地质图的并不多。

在1940~1960年的大部分年代里,石油工程师曾力图说服石油经营者,开采石油时没有必用密井网的方法。每40, 80或者甚至160英亩(也即16, 32或64公顷)钻一口井已足够排出油层内的油。这样可以节约很多不必要的钻井费用。在美国会经常发生好多石油经营者同

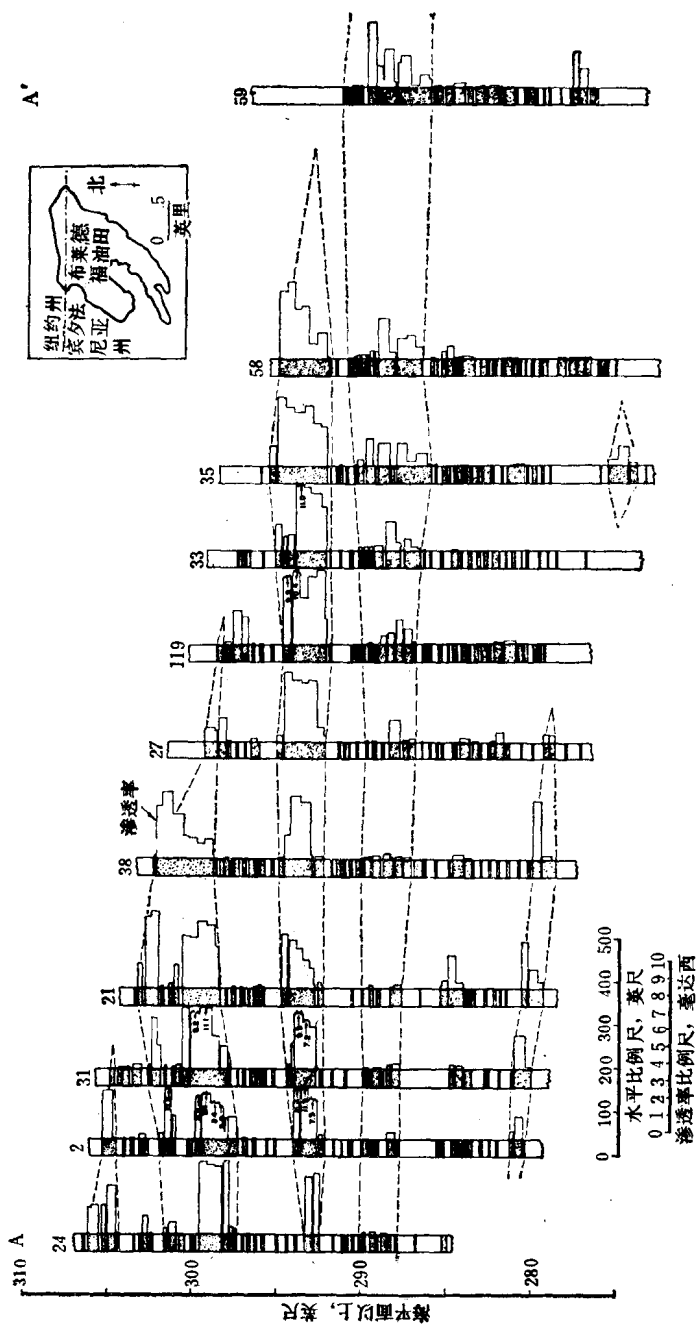


图1-4 宾夕法尼亚州布莱德福德油田各个砂岩储集层横剖面(据Wilson, 1950)

时开采一个油藏。此时，即使有某些石油公司为了省钱，希望钻少量井（例如40英亩一口井），以获得密井网同样产量的油，也是不可能，因为在该公司旁的另一些公司，如果钻更多的井，如每40英亩（16公顷）4口井的话，石油将向井距最密处运移。

在进行二次采油时，需要把流体注入储集层内，对于有知识的采油作业人员来说，他清楚地了解所注入的液体并不是均匀地驱扫石油，而是在含有残余石油地层的上下或周围绕过。因之不论二次采油甚至三次采油，良好地驱油是该方案成功的关键所在。一般而言，可以用缩小井距的办法来提高驱油效率。三次采油的成本之所以比初次或二次采油的成本高得多，其主要原因是三次采油需钻更多的井。

实验室试验时，有许多提高采收率的方法效果良好，但应用于油田现场，则结果往往令人非常沮丧，因此而产生了我们通常称之为“一致性”的概念。所谓“一致性”，即人们希望能推导出一种数学公式，它能表达真实的、但在地质学界还不完善的油田理想状态。这种提法在思路会上造成严重的误解。因为储集层的生产方法必须与地质条件相一致；我们不能期望地质条件与数学方程相吻合。当然在考虑注水或提高采收率作业时，计划必须适合储集层的地质条件。提高采收率方法的选择、井距和井网的决定以及整体作业的考虑等，计划必须与具体地质条件相一致。

第4节 储集层的形状和大小

地层的连续性 砂岩总是成层出现，常呈多层性并被薄页岩条所分隔。每一个砂岩体代表单一的沙滩、点沙坝或河床，它们或是并排或是各层顶部相叠。同一单元之内渗透性良好，但各单元之间渗透性就很差。这种渗透性遮挡层虽然能在岩芯中明显地观察到，但往往由于太薄而不能在电测图上反映出来。

在深入细致的作业中，最好对不同砂岩体加以区别对待，并研究其各自的渗透性。如井距密度足以对每一砂层进行描述，就可能选用应有的完井方法，并以不同压力把流体注入不同的砂岩体。

横向连续性较好的砂岩体，给提高采收率提供了有利的条件。砂岩体间的水平层状分割，往往有助于流体保持平行层理的方向流动。但可惜的是它们常有明显不同渗透率的隔层，这种储集层的非均质性是提高采收率失败的主要原因之一。

在这种情况下很难对碳酸盐储集层进行描述。有些竖立的礁体具有良好的垂直渗透性，有利于使用重力驱动、气顶驱动或溶剂驱动。在经常遇到的裂缝孔隙度问题上，裂缝的方向性有时可以鉴别，但其平均间距或确切位置就很难说了。

含水层的大小和形状决定着油田是否用水驱还是溶解气驱进行生产。有些油砂横向分布广，其中如东得克萨斯盆地的伍德宾矿岩以及俄克拉何马州塞米诺尔地区的威尔科克斯（Wilcox）砂岩。这些地区砂岩中的油藏可以在持续水驱下产油。其他许多地区，经常在水侵入储集层上千英尺后就停止推进。这种现象说明了即使在大的含水层中，侵入储集层的水乃因含水层中水的体积膨胀所致，没有地表水的补充。另一方面，在近岸沉积环境薄的透镜状储集层中最容易找到石油。这可能是因为在巨厚的砂层中，没有足够的遮挡层去筛除和滞留石油。所以，对新发现的油田含水层大小进行早期评价是极重要的事，因为此后的全部动态要靠它来决定。

许多碳酸盐岩储集层与大片含水层水动力连通，这在礁体中尤为明显。这类岩体中，存在着大量的充水空隙，而穹体顶端则为小容积的石油。此时如果垂直渗透率良好，油采出时

水将上升而取代石油。另一方面,也有些礁体互相隔离,并不与大面积孔隙性碳酸盐岩相联。

孔隙度的类型 孔隙的大小和形状变化多端,这种变化受原有的颗粒大小分布所控制,更受隙间粘土和次生硅的性质与数量所决定。砂岩的孔隙既像四壁光滑的通道,又似多少充填着松软粘土的不规则孔穴。一般认为,凡是光滑而形状规则的孔隙具有最佳的采收率,但关于这方面的因素几乎很少受人注意。甚至对比这更重要的孔隙内部表面的湿润性状态,同样较少探讨。

碳酸盐岩中孔隙度的大小差别更大,大的可行驶载重10吨的卡车,而就在这旁边的微孔隙肉眼难以鉴别。因此,碳酸盐岩中流体的动态很难了解。人们经常试图把碳酸盐岩中的储集层动态和砂岩加以比较。为了方便起见,我们需要定量确定特定岩石的孔隙大小和形状,然后再对该特定油藏的储集层动态加以解释。

埃尔金斯(Elkins, 1950)曾指出,当溶解气从溶液中逸出时,它先在通道中呈连续性的细线,然后见于隙间孔隙。这意味着天然气开始流动比在砂层条件下含油饱和度要高。因此在裂缝性的和多孔性的碳酸盐岩中,气驱比砂岩的效果差。据推测,把石油驱出隙间孔隙的唯一办法是降低通道内的压力,以促使油中的溶解气把石油从孔隙驱入通道。次生气驱或水驱只能把通道中的石油驱出,对于隙间孔隙中的油,实际上反而会被堵住而孤立。由于这一原因,在石灰岩中进行二次采油的计划,很少成功。

岩石的压实作用对采油所产生的重要影响人们往往认识不足。这种影响主要出现在未固结的地层中。根据页岩密度可以定量地决定固结的程度。可以认为,页岩的密度如小于2.2左右,应注意发生压实和表面沉降的可能性。

渗透率对采油的影响很大。低渗透率岩石的一次采收率低,但因此在地层内保留有较多的石油,所以对提高采油率来说较有希望。另一方面,低渗透率大大增加了注入流体的难度和费用。

第5节 构造

倾角 重力驱油和气顶驱动的有效开采只有当岩石具有相当陡的倾角(大约 15° 以上)时才有效。倾角陡也有利于水驱,因为具有较高密度的水将均匀地往前推移。盐丘翼部的特征是储集层具有极陡的倾斜,并伴有很强水驱现象。

断层 几乎所有背斜储集层都有断层切过。它们常与背斜的轴线呈 70° 角。一般断层具封闭性,储集层分割成各个单元,每个单元有其本身的压力和油水接触面。为了进行有效的生产,每个断块必须作为独立的储集层来处理。

在很多情况下,当水注入具有断层的油田时,液体将沿断层流动。毫无疑问,之所以发生这种情况,是因正常情况下断层闭合紧密,但当注入压力超过原始的储集层压力时,液体压开断层并沿断层流动。如注入压力不很快降低,则沿断层侵蚀成固定的通道,储集层将因此而遭受永久性的破坏。

节理 节理是自然存在的垂直裂缝,在深处常常闭合紧密。但注水时所施加的压力可促使裂缝张开,从而造成严重的液体绕行。

第6节 流体的含量

地质储量(原地石油) 无论一次采油或二次采油,最重要的问题是必须决定油层中的

地质储量 (Dickey, 1950)。不少提高采油率的方案仅仅由于地质储量不足而遭致失败。从岩芯或电测资料来判断地质储量有一定困难,有关这一问题将在第3~4章中再详加阐述。

原始地质储量有时以固态的焦油形式出现。其他如石蜡、沥青以及焦沥青均会在储集层中存在。用一般的岩芯分析或供地质评价用的大多数电缆测井方法,无法区分这类原油。所以二次采油往往在发觉大部甚或全部“原油”是固态前就已着手进行了!

因为钻井泥浆对岩芯和电测的影响,在一次采油开始以前要判别油层中的地质储量更是困难。最恼火的是在一次采油末期要作出这种重要的判别同样是困难的。二次采油方案的是否成功取决于执行方案初期和末期的产量差。在二次采油完了以后则很容易判别,因为那时的含油饱和度已降低到不能再低的程度,无论钻井和取芯已不能促使其继续降低了。

隙间水饱和度 在采油的初始阶段,孔隙中的油、水相对含量由储油岩和毛细管性质如何来决定。如果砂岩主要被石油所湿润,一般认为,水是一种不良的采油剂。因为它可以流过较大的孔隙,而不会把油从较细的孔隙表面剥离驱出。布莱德福砂岩的含水饱和度较毛细管压力曲线所预测的要低得多,因此该砂岩只能部分是油湿润的,用注水方法在该处取得了显著的成功。至于主要是油湿润的储集层,尚未得到确证。

孔隙中含水饱和度高,在气驱条件下能提高采收率 (Dickey和Bossler, 1944)。原因是水具有把石油挤至较大孔隙的倾向,气体便在那里把石油驱出。

气体含量 石油中含溶解气越多,一次采油的收获也就越大。这是因为所含的大量天然气的膨胀,把石油从孔隙中驱出。同样,在低粘度的石油中含有大量溶解气体,是以对低粘度石油进行二次采油,效果很好。

含气很少的石油往往质重而粘。人们认为在这种情况下,有的一次采油率只有10%;至于对高粘度油的二次开采,除非注入蒸汽,否则业已证明收效不大。

有气顶的地方,因气顶驱动的作用而有利于一次采油。不过由于原始气顶的减压,石油向上运移并湿润了砂层,以致好些石油无可补救地损失掉了。

第7节 设计符合地质条件的开发方案

井距 一次采油时,如遇到分布广而均质的砂层,只要一口井即可提取全部储集层中的油。所以多打井的唯一好处是出油速度加快而已。

显然井距越密则采油也更完全。遗憾的是许多研究这一问题的学者 (Craze和Buckley, 1945; Arps等, 1967),没有能揭示一次采油时井距与最终采油量之间的任何定量关系。因此井距的研究已成为经济学上的问题——为了投资效益,以最短的时间获取最大产油量,则井距越密越好。因为井越多,出油也就越快。

但是二次采油更需要采用较密的井距。当流体 (无论是气体或水)注入时,注入的速度必须足够快到使产油率经济可行。井距要随储油层的渗透率而定。还有一个重要问题,即注入井与生产井应钻入同一个单元砂岩体内。

井网 在提高采收率的作业中,很显然井网的布置必须与地质条件一致。如果砂岩体由一连串并列的海滩或沙坝组成的话,必须搞清楚它们的排列方向,可用等厚图和电测对比图来表达。砂岩体的电测对比图常常在一个方向上,几乎极少其他方向。横切砂岩体的井距应布置得密一些;沿长轴方向井网可以疏些。

有天然裂缝存在的地方,或由于施加高压后有意或无意产生裂缝的地段,井网排列必须使注入井至生产井的方向与裂缝走向成直角。

就提高采收率而论,一般最好使注入井数至少等于生产井数。这一问题的重要性还没有普遍为人们所认识。我们可以设想一下,如果一口注入井的周围均是生产井,那么注入的流体或许会从一个特殊方向流失,很难对生产井起什么作用。反之,如果一口生产井被一圈注入井所包围,则石油会从四面八方驱向中间,而不致逸散。

完井方法 油井的完井方法必须根据地质条件,特别是岩石的性质。

就未固结的地层来说,砂粒会流入井筒,使之堵塞而影响出油。它们会磨损泵和油管联接处。在这种情况下,应把细筛管下入井中,外侧填入砂砾。有时也采取注入塑性物质以固结砂粒。不过这些方法均不是完美无缺的。

在地层中等固结的情况下,可用套管固井,以射孔子弹或聚能炸药对套管和水泥进行射孔。

如遇到坚硬而不渗透的地层,可泵入混砂的流体进行水力压裂,使地层形成垂向辐射状的裂缝,用砂支撑这些裂缝。这一措施不适用于靠近油水接触面处,因为水会侵入裂缝中。

参 考 文 献

- Alpay, D. A., 1971, A practical approach to definition of reservoir heterogeneity: SPE Paper 3608.
- Bowen, J. M., 1975, The Brent oil-field, in Austin W. Woodland, ed., Petroleum and the continental shelf of northwest Europe: New York, Halsted Press, p. 353-360.
- Craig, F. F., Jr., P. O. Willcox, J. R. Ballard, and W. R. Nation, 1976, Optimized recovery through cooperative geology and reservoir engineering: SPE Paper 6108.
- Craze, R. C., and S. E. Buckley, 1945, A factual analysis of the effect of well spacing on recovery: API Drill. and Prod. Practice, p. 144.
- Dickey, P. A., and R. B. Bossler, 1944, Role of connate water in secondary recovery of oil: AIME Trans., v. 155, p. 175.
- , 1950, Influence of fluid saturation on secondary recovery of oil, in Secondary recovery of oil in the U.S., 2nd. Edition: New York, American Petrol. Institute, p. 222-227.
- Dowling, Paul L., 1970, Application of carbonate environmental concepts to secondary recovery projects: Soc. Petrol. Eng. SPE Paper 2987, 16 p.
- Eckelman, W. R., and R. J. Dewitt, 1975, Prediction of fluviol-deltaic reservoir geometry, Prudhoe Bay, Alaska: Trans. World Petroleum Congress, Tokyo, Japan, v. 2, p. 223-228.
- Elkins, L. E., 1950, The importance of injected gas as a driving medium in limestone reservoirs as indicated by recent gas injection experiments and reservoir performance history, in Secondary recovery of oil in the U.S., 2nd Edition: American Petrol. Institute, New York, p. 370-382.
- Fettke, C. R., 1950, Influence of geological factors on secondary recovery of oil, in Secondary recovery of oil in the U.S.: New York, American Petrol. Institute, p. 204-213.
- Fettke, C. R., 1950, Water flooding in Pennsylvania, in Secondary recovery of oil in the U.S.: New York, American Petrol. Institute, p. 413-443.
- Flewitt, W. E., 1975, Refined reservoir description maximizes petroleum recovery: Soc. Prof. Well Log Analysts, Annual Logging Symposium.
- Halbouty, Michel T., 1975, Needed, more cooperation between earth scientists and petroleum engineers: SPE Paper 6107.
- , 1977, Synergy is essential to maximum recovery.: Jour. Petrol. Tech., July 1977, p. 750-754.
- Harris, D. G., 1975, The role of geology in reservoir simulation studies: Jour. Petrol. Tech., May 1975, p. 625-632.
- Hewitt, C. H., 1966, How geology can help engineer your reservoirs: Oil & Gas Jour., Nov. 14, 1966.
- Jardine, D., D. P. Andrews, J. W. Wishart, and J. W. Young, 1977, Distribution and continuity of carbonate reservoirs: Jour. Petrol. Tech., July 1977, p. 873-885.
- King, R. L., and W. J. Lee, 1976, An engineering study of the Hawkins (Woodbine) field: Jour. Petrol. Tech., February, p. 123-128.
- Kingston, P. E., and H. Niko, 1975, Development planning of the Brent field: Jour. Petrol. Tech., October 1975, p. 1190-1198.

Larson, Thomas C., 1974, Geological considerations of the Weber Sand reservoir, Rangely field, Colorado: Soc. Petrol. Eng.-SPE Paper 5023, 8 p.

Morgan, J. T., F. S. Cordiner, and A. R. Livingston, 1977, Tensleep reservoir study, Oregon basin field, Wyoming, reservoir characteristics: Jour. Petrol. Tech., July 1977, p. 886-896.

Wayhan, D. A., and McCaleb, 1968, Elk basin heterogeneity—its influence on performance: SPE Paper 2214.

Wilson, Wallace W., 1950, Supplement to Fettke, C. R., 1950, Influence of geological factors on secondary recovery of oil, in Secondary recovery of oil in the U.S.: New York, American Petrol., Inst., p. 211.

Zeito, George A., 1965, Interbedding of shale breaks and reservoir heterogeneities: SPE Paper 1128.