

石油科学进展 9

压实与流体运移

(实用石油地质学)

真柄钦次原著

石油工业出版社

2958

石油科学进展9

压实与流体运移

(实用石油地质学)

真柄钦次 原著

陈荷立 邱世祥 汤锡元 等译



SJ57/06



石油工业出版社

内 容 提 要

本书为《石油科学进展》丛书之九。它在详细探讨页岩压实理论的基础上,以大量实际资料,着重介绍了页岩压实研究在石油勘探中所能解决的问题和具体方法。诸如:页岩孔隙压力、流体损失量、孔隙水含量、封闭深度等的计算,以及这些资料在研究地下流体运移状况时的应用;剥蚀厚度和最大埋深的计算,及其在研究地层所曾达到的最高温度和分析构造形成次序时的应用等等。此外,书中还探讨了页岩压实作用与底辟构造形成之间的关系,孔隙度与渗透率之间的关系,以及从流体运移的观点评价油气储量等问题。

可供石油地质、地质部门技术人员、科研人员和有关院校师生参考。

本书前言由石民生同志翻译;第1~4章及第8章由陈荷立同志翻译;第5、6章由汤锡元同志翻译;第7章及第9~15章由邵世祥同志翻译。石民生、汤锡元同志曾审阅全部或大部分译稿,最后由陈荷立同志进行校订和定稿。一些日本人名和地名的翻译曾得到邵世祥、韩绍如同志的大力支持,特此表示谢意。

Developments in petroleum science. 9
COMPACTION AND FLUID MIGRATION
Practical petroleum Geology kinji Magara
Elsevier Scientific Publishing Company
Amsterdam-Oxford-New York 1978

石油科学进展 9 压实与流体运移 (实用石油地质学)

真锅敏次 原著

陈荷立 邵世祥 汤锡元 等译

石油工业出版社出版
(北京和平里七区十六号楼)
大厂回族自治县印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 1/16开本 印张15 1/2 字数 357 千字 印数1—1200

1981年9月北京第1版 1981年9月北京第1次印刷

书号15037·2288 定价1.55元

前 言

压实是受压力控制的一种现象，压实时，通常将使构成沉积物的颗粒在垂向上更紧密地聚集在一起。在大多数情况下，压力是由经受压实岩石上覆沉积物的有效重量产生的，但是也有由侧向压力造成压实的情况。随着埋藏深度（以下简称埋深）的不断加大，温度也随之上升，这种上升可引起矿物的变化，特别是在引起结构水或结合水从矿物颗粒脱出的地方，也必然会引起压实作用。孔隙流体的成分，特别是最常见的孔隙流体（水）中溶解物的性质和数量，可以影响压实作用；而且，它也影响胶结作用，以及与所谓压溶现象有关的矿物质的再分布。除此之外，矿物颗粒的性质和大小也会影响压实。由一已知压力增量产生的压实量变化很大。压实基本上是不可逆的，压力降低仅能导致弹性恢复，只有在石膏或硬石膏层系中是个例外，在这些层系中矿物变化对压实作用的影响是可逆的。

压实可引起孔隙度减小、容积密度加大（因为固体矿物比孔隙度减小时排出的孔隙流体密度大）、电导率减小（当孔隙流体是水溶液时）、渗透率降低，以及地震脉冲传播速度的增加等。某些岩石性质的直接测量，特别是在原地下条件下的直接测量，是受限制的，但是，有时可根据测出的其它性质合理的推论这些数值，譬如根据各种类型的电测曲线。

有机质和粘土一类的细粒无机矿物受压实的程度最高，石膏或硬石膏层系的压实程度也相当大；原始粒级较粗的沉积物，如砂岩和某些石灰岩，压实程度最小。在有机物和细粒无机矿物质的埋藏过程中，压实是递增的，在石膏、砂岩和石灰岩中，以及在形成缝线构造时，压实的主要时期将被推迟。

压实的结果必然导致流体的运动，虽然这不是引起流体通过岩石流动的唯一营力。这种流动可使与原有流体成分不同的流体与固体相接触，从而有可能影响固体在成分或溶解（沉积）作用方面的变化。温度不断升高可使某些固体发生变化，裂解的流动产物可被运移着的流体带走。当压实作用进行到不能与该岩石类型和压力温度条件继续保持正常关系时，就会产生欠压实状态，同时产生流体超压出现。

受压岩石的厚度和性质在侧向上的变化，可导致压实量的不同，并可使上覆岩层的构造发生变化。压实在地质学上是很重要的，并且与民用工程也有关系。它可引起地表沉降，这种沉降可通过人工处理加以改善。

作者在40多年前即开始注意与油气运移和聚集以及差异压实有关的压实作用。并曾在定量研究方面作过尝试，后来又提出了推论最大埋深差的基本概念。真柄钦次博士特别注意压实现象的定量，尤其是从可压实岩石中排出的水量。他试用了近年来为进行井下测量而发展起来的大量技术，从而获得了一些补充资料，这些可为学习更多有关压实概念的知识或更有效地使用这一概念作出有用的推论。

G.D. 霍布森

1977年7月

目 录

前 言

第一章 绪论 (1)

- 一、历史背景 (1)
- 二、本书涉及的内容 (2)
- 三、沉积物中水的运动 (4)
- 参考文献 (6)

第二章 页岩压实作用以及剥蚀和构造时序的估算 (8)

- 一、页岩孔隙度-深度关系 (8)
- 二、页岩传播时间-孔隙度关系 (9)
- 三、沉积岩剥蚀厚度的估算 (11)
- 四、剥蚀厚度与最大埋深 (16)
- 五、估算剥蚀厚度的其它方法 (17)
 - (一)地震横剖面 (17)
 - (二)由地震记录得出的层速度 (18)
 - (三)砂岩孔隙度 (18)
 - (四)有机质的颜色 (19)
- 六、正常压实作用斜率的变化和沉积速度 (19)
- 七、利用页岩传播时间图分析构造时序 (23)
 - (一)早白垩世 (初期构造作用) (24)
 - (二)早白垩世晚期 (主要构造作用) (24)
 - (三)晚白垩世或更晚时期 (主要构造作用以后) (24)
- 八、上述方法的局限性和可能存在的问题 (25)
- 九、其它测井曲线的利用 (26)
- 十、在加拿大西部估算剥蚀厚度的实例 (26)
- 参考文献 (30)

第三章 根据页岩压实资料计算孔隙压力 (31)

- 一、特察模型和地下模式 (31)
- 二、流体压力的计算 (31)
- 三、水热增压 (35)
- 四、水热和非水热概念的应用 (38)
 - (一)连续沉积和埋藏的地区 (38)
 - (二)明显上升和剥蚀地区 (39)
- 五、利用图表估算孔隙压力 (40)
- 六、流体压力、深度与等效泥浆重量间的关系 (41)
- 七、泥浆重量的直接估算 (43)

• • •

八、用计算机计算流体压力	(44)
九、利用其它测井曲线计算压力	(48)
十、估算流体压力的经验方法	(48)
(一) 声波法	(49)
(二) 电阻率法	(50)
十一、测井曲线图实例	(52)
附录 3—I	
附录 3—II	
参考文献	(55)

第四章 地下异常压力的起因 (58)

一、压实作用	(58)
二、水热效应	(64)
三、蒙脱石的脱水作用	(65)
(一) 压实不平衡	(66)
(二) 蒙脱石的脱水作用	(87)
四、承压条件	(72)
五、油气的聚集	(72)
六、渗析作用	(72)
七、古压力	(73)
八、胶结作用	(73)
九、构造作用	(73)
十、烃类的生成	(75)
十一、注入作用	(75)
参考文献	(75)

第五章 计算压力和孔隙度的应用 (77)

一、压力与孔隙度剖面	(77)
二、排水图	(82)
三、孔隙度图	(92)
四、流体和烃类的排出	(95)
参考文献	(96)

第六章 流体损失量计算的概念及应用 (97)

一、页岩在成熟前后流体损失量的计算	(97)
二、“回弹”问题	(101)
三、流体随时间损失量的计算	(102)
四、流体损失量计算实例	(102)
五、非粘土成分的校正	(108)
六、有机质类型的影响	(103)
七、流体损失曲线	(109)
八、流体损失图	(110)
参考文献	(110)

第七章 压力封闭和毛细管封闭的估算	(111)
一、压力封闭深度的计算	(112)
二、压力封闭时间的计算	(113)
三、压力封闭前后流体损失量的计算	(114)
四、压力封闭和烃类过剩压力的比较	(117)
五、毛细管封闭	(118)
六、压力封闭的实验室模型	(120)
(一)实验A:用蒙脱石粘土	(121)
(二)实验B:用同样的蒙脱石粘土	(122)
参考文献	(122)
第八章 三维空间流体运移的概念	(123)
一、流体水平和垂直运移的方向	(123)
二、流体垂直和水平运动的体积	(127)
三、三维流体流动研究实例	(133)
参考文献	(134)
第九章 页岩孔隙度与渗透率的关系	(135)
一、页岩中流体压力梯度和流体的运动	(135)
二、页岩孔隙度与渗透率间的关系	(137)
三、由测井曲线得出的与由实验室得出的孔隙度-渗透率关系的比较	(141)
四、向下和向上排出的流体体积	(143)
参考文献	(145)
第十章 压实过程中页岩孔隙水含盐量的变化	(145)
一、根据测井资料计算孔隙水的含盐量	(146)
(一)页岩孔隙水的含盐量	(146)
(二)砂岩孔隙水的含盐量	(148)
二、压实过程中水的含盐量变化	(150)
(一)粘土或页岩对离子的渗透作用	(150)
(二)离子渗透作用开始发生的时间	(154)
(三)“含盐量 $\times$ 孔隙度”图	(155)
三、水的含盐量资料在勘探工作中的应用	(157)
(一)与层状盐岩沉积接近	(159)
(二)异常压力	(160)
(三)大范围的渗透性砂岩	(160)
(四)沉积环境	(160)
(五)淡水的混合作用	(164)
参考文献	(164)
第十一章 页岩底辟作用中异常压力的重要性	(165)
一、异常孔隙压力及其对页岩流动控制的重要性	(166)
(一)无水热增压效应的页岩压实模式	(166)

(二) 有水热增压效应的页岩压实模式	(167)
二、底部页岩上覆岩石的运动	(169)
三、差异负荷的作用	(172)
四、浮力效应	(173)
参考文献	(174)
第十二章 成油阶段的估算	(175)
一、烃类生成的时间-温度关系	(175)
二、图说说明	(178)
三、图的应用	(178)
四、石油生成图与世界油气储量的对比	(180)
参考文献	(180)
第十三章 古孔隙压力和古温度的估算	(181)
一、古孔隙压力的估算	(181)
(一) 地温梯度	(182)
(二) 保存所生高压力的能力	(183)
二、古温度的估算	(183)
参考文献	(186)
第十四章 油气的初次运移	(187)
一、压实作用引起的流体运移	(188)
二、水热效应引起的流体运移	(190)
三、渗析作用引起的流体运移	(193)
四、粘土脱水作用引起的流体运移	(193)
五、初次运移的其它可能原因	(196)
六、初次运移时烃类的形式	(196)
七、石油以油相的运移	(197)
参考文献	(201)
第十五章 根据砂岩厚度和类型以及母岩性质对石油储量的评价	(203)
一、储集层和母岩的关系	(203)
二、砂岩的模式	(204)
三、流体运移模式	(205)
(一) 流体的垂直运移	(205)
(二) 流体的水平运移	(207)
(三) 流体的综合运移	(208)
四、不同流体运移模式的应用	(209)
五、这种方法在勘探中的应用	(209)
参考文献	(210)
附录 3—1 附图 (共十幅)	
附录 本书所用人名英、中对照表	(221)
本书所用地名及地层名英、中对照表	(222)

第一章 绪 论

普通的油和气一般皆发现于砂岩、石灰岩和白云岩的孔隙空间和张开的裂隙中。页岩虽然许多情况下做为烃类母岩和盖层是重要的,但通常都不含工业价值的油和气。换句话说,从生产观点看来,页岩是相对无用的岩石。

譬如,当钻了一口探井,地质学家试图评价是否钻到油和(或)气聚集时,他常会首先分出无关紧要的页岩段,然后再试着去弄清楚界面的其余部分是为油(和气,或气)所饱和还是为水所饱和的。

在一般油气研究中经常遇到这样被轻视的岩石——页岩——却正是我的研究主题。因为现在我深信页岩在石油勘探中,不仅做为原生烃类母岩是重要的,而且做为封闭、压实流体(它可影响或控制烃类运移的方向和体积)的产地、过剩压力(构造产生的原因)的源泉,以及做为可能与储集层发育有关的地下排水条件指标等也都是重要的。所以,加强沉积盆地中页岩的研究可给油气勘探工作带来很大好处。我也知道这样的研究以前还是空白,但它必定是与许多其它研究领域相联系的,例如,构造地质学、地球化学、矿物学、水文学、岩石学、地球物理学、测井、钻井工程、采油工程等等。

这方面的研究虽取得了一些进展,但远未彻底解决问题。尽管近年来在这方面的一般兴趣明显的加强了,然而在这个专门领域中工作的研究人员现在仍为数较少。

自从大约10年前我在日本开始研究细粒碎屑沉积以来,曾从许多工作者的书面和口头讨论中得到了帮助,他们影响了我以后的思路。因此,在我看来,对这些人士最好的致谢方式,是简短的提一提关于包括在本书中的一些论题方面,我的思想发展的历史和背景。

一、历史背景

自六十年代早期以来,我对页岩压实作用及其对圈闭发育的影响日益产生了兴趣。那个时候研究页岩压实作用的主要资料来源是靠岩芯和岩屑样品(Athy, 1930; Hedberg, 1936; Dickinson, 1953)。我做为一个实际地质工作者,根据以前在机械测井分析方面的经验,使得我有可能用这样的曲线去研究页岩压实作用。那时,测井曲线对地质人员来说,只是一种对比的工具;而对曲线分析人员来说,则只是储集岩中烃类的一个半定量指标。一旦钻井成功并发现了油气,大量的这些曲线就废用了。

在储集层段中经常要取岩芯,但是在页岩段却从来很少取芯。因此,机械测井曲线就成了研究页岩压实作用可以利用的唯一资料来源。以前斯伦贝尔提出的研究孔隙度的新手段,如声波和密度测井曲线都是非常有用的(Schlumberger, 1972)。

我最初研究测井曲线资料的主要意图只是为了把压实的沉积物恢复到过去地质时期压实较差的程度。这种恢复的厚度可用于解释占构造,而后者可能曾控制烃类运移的方向。

1965年发表了几篇关于运用测井曲线资料评价孔隙压力的文章(Hottum and Johnson, Wallace),它们引起了许多石油地质学家和工程师们的注意。霍特曼与约翰森的文章深深

地触动了，它使我懂得了孔隙压力与压实作用的关系，并促使我进一步去研究有关土壤力学试验方面的一些著作，其中特别是特察与佩克 (Terzaghi and Peck, 1948) 的著作，哈伯特与鲁贝 (Hubbert and Rubey, 1959) 将同一概念用于地下研究的著作，以及在岩石力学方面的著作，例如汉丁和黑格 (Handin and Hager, 1957) 的著作。

虽然霍特曼和约翰森的文章指出在页岩压实作用与其孔隙压力之间存在有一经验关系，但是我怀疑除去页岩压实作用以外还有一些其它的因素也影响孔隙压力，因为压实-压力的经验资料有时与压实理论不符。经验关系是许多因素的综合结果，而我想了解的却是每一个因素的影响。为了揭露这些影响，必须综合分析理论、经验资料 and 实际地下资料。

我在日本利用测井曲线和其它地质资料继续研究压实作用。那里的主要生产层是火山岩（熔岩和凝灰岩）和砂岩。当时对这些储集层上下页岩孔隙度的详细研究表明，在一个盆地中页岩的孔隙度变化很大，公认的平滑孔隙度-深度曲线并不能反映个别位置的关系。页岩孔隙度常朝着互层为渗透性层段降低，对这种孔隙度变化最容易的解释是由于页岩在“岩性”或“成分”方面有变化。但是，我曾发现许多这样的例子，那里页岩并没有可觉察的成分变化，而其孔隙度却变化很大。这些情况只能靠了解过去地质时期中页岩孔隙压力和地下水排水条件来获得解释。这种研究途径也可引导我们去更好地了解烃类从页岩进入储集层的初次运移问题。

1967年我来到了加拿大，有机会在那里的地质调查所继续研究页岩。在此期间，粘土矿物学家对异常压力的产生和初次运移问题获得了进一步的了解 (Powers, 1967; Burst, 1969)。

在完成了与加拿大地质调查所的协定之后，我加入了皇家石油公司，在那里我幸运地能够继续对细粒碎屑沉积进行研究。自此以后，我的工作受到了两个重大因素的影响。第一是我同更多不同专业的人的协作，从而同更多学科内容的结合；其次是利用了计算机。

对用薄片和X-射线详细分析页岩成分，以及对烃类成熟度、热流和岩石破裂等问题的重视，显著地扩大了细粒碎屑沉积研究的领域。在此期间，巴克 (Barker, 1972) 对了解异常压力的产生做出了重大的贡献。他介绍的水热增压 (aquathermal pressuring) 概念，使我们在这方面的知识得到了很大提高。

流体损失体积的计算是1967年以来我研究的一个重要部分，近来计算机的应用明显地改进了计算结果。用计算机还可以利用机械测井曲线求孔隙压力，和从地震层速度资料中求流体压力。

孔隙水的含盐量可由自然电位曲线分析求出，计算出的数值可用水样化学分析结果进行检验。这样的计算对于页岩当时还是一种新方法。我曾综合应用声波和电阻率（或电导率）测井曲线进行这种估算。由于压实和离子渗透作用引起的页岩孔隙水含盐量的变化，以及由此而产生的渗析流体运动，同样可在初次运移中起作用。

二、本书涉及的内容

为什么要研究细粒碎屑沉积呢？我的回答是：

- (1) 它们大约占碎屑沉积盆地填充物的75%；
- (2) 它们含有生成烃类的有机质；
- (3) 它们含有流体，当这些流体由于压实而被排出时，可携带烃类进入有利的圈闭；

- (4) 由其中排出的流体携带有溶解的离子, 后者可借胶结作用降低储集层的孔隙度;
 (5) 它们可在碎屑岩圈闭中形成顶部和底部封闭;
 (6) 它们有时可产生象页岩底辟这样的构造。

图 1—1 表示了这些课题的细节。

假定在地下有一细粒岩石 (图 1—1 顶部右侧的矩形), 其中含有一定数量的孔隙水和造岩物质 (或矿物)。孔隙水的数量通常用孔隙度表示, 后者是衡量压实状况的标准。利用这个资料可以解释剥蚀厚度和最大埋深, 也可以用它将压实地层恢复到压实前的厚度。根据正常压实趋势的斜率, 还可估算沉积作用的相对速度。从页岩压实得出的所有资料都有助于解释构造形成的时间, 而对远景评价来说, 构造形成时间是很重要的。

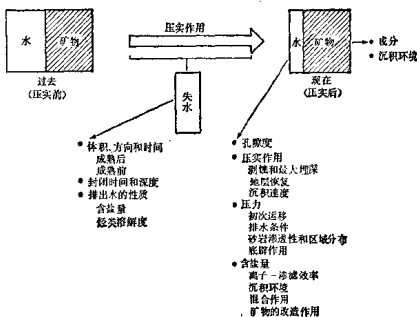


图 1—1 页岩压实研究内容略图

依靠研究压实状况与深度的关系, 可以求出细粒岩石的孔隙压力。孔隙压力方面的资料可用于了解初次运移和页岩的排水数率, 以及获得与其互层砂岩的渗透性和分布范围的某些概念。极高压力的生成可引起页岩底辟。

如前所述, 从测井曲线可计算出孔隙水的含盐量。研究页岩在压实过程中离子渗透效率可以得出原始含盐量或沉积环境的概念。过去地质时期中淡水或咸水的混合作用以及粘土矿物的变化都可能影响现在含盐量的分布。所以, 孔隙水含盐量的研究可以提供有关这些问题的一些概念。

所有上面提到的这些孔隙水的资料在研究流体运移和烃类聚集时都是有用的。

在这个细粒碎屑研究方案中一个重要的和独特的研究项目是失水量的研究 (图 1—1, 中间的矩形)。如果我们知道地下页岩现在的含水体积 (或孔隙度), 同时如果我们能够推测出页岩在沉积时的孔隙度 (此孔隙度值可以靠将地下孔隙度正常趋势延长到地表而获得), 我们就可以计算出总的失水体积。综合考虑地球化学资料与失水体积, 即可得出成熟前和成熟后流体损失的体积。为了解石油运移和聚集作用, 还可以计算出随后地质时期中流体的继续损失, 并解释其与圈闭发育时间的关系。三维流体运移分析常可进一步加深我们对石油运移的了解。封闭时间和深度的概念在研究流体运移和聚集时可能也是重要的。

过去地质时期中从页岩中排出水的含盐量 (不是现在在地下页岩中孔隙水的含盐量) 也可以估算。排出水的含盐量在烃类运移中可能是重要的, 因为烃类在水中的溶解度随其中盐离子数量而变化。

一般在细粒碎屑沉积研究中，应注意下列问题：

(1) 我们的基础资料几乎全部是由机械的和地震方面的资料组成的。因为，实际上我们不能依赖岩芯或者甚至好的岩屑资料，学会如何从我们所掌握的大量测井曲线和地震资料中，取得所需要的地质资料是十分重要的。

(2) 所有的计算解释和图幅可以用人工，也可以用计算机做出；计算机法简单、便宜，如利用分时计算机，还可立即获得成果。因此，是用这些资料的每个实际地质工作者都可以利用的方法。

(3) 提出的几种解释可用其它类型的资料加以核对，这些资料有水化学、X-射线、压力、地球化学和孢粉等。

关于页岩及（或）其压实作用的许多问题仍在争论。但在本书中重点反映的是我自己的和我所赞同的其它一些观点。我还介绍了支持这些观点的许多地下资料。我也尽力解释了与页岩压实作用有关的许多因素的相互关系，例如页岩孔隙度、压力、流体损失、水的含盐量、封闭作用等等。换句话说，本书所介绍的各种观点具有一个共同的或一致的基础，所以，它们之间不会有什么严重的矛盾。

因此，这本书并不是一本包括许多不同意见和资料的参考书。确切的讲，它是一本指导实际应用这些技术进行石油勘探的手册。

三、沉积物中水的运动

在沉积盆地中流动的水基本有两种不同类型，其特点分别为：

1. 沉积来源的水

- (1) 这类水的运动发生于沉积盆地的任何部位（深处或浅处）。
- (2) 小规模运动的主要方向是从页岩或泥岩向砂岩或其它渗透性地层。
- (3) 大规模的运动方向是从盆地中心向其边缘，或从深处向浅处。
- (4) 水的数量是有限的，因为在一个盆地中沉积物的数量通常是有限的。
- (5) 这类水的运动在烃类初次运移中可能是重要的。
- (6) 这类水的大量运动发生于过去地质时期中。

2. 大气水

- (1) 这类水的运动在沉积盆地较浅的层段是重要的。
- (2) 小规模的运动方向或是从砂岩向页岩，或是从页岩向砂岩。然而这类水的大量运动只可能发生在砂岩中。
- (3) 大规模水运动的方向是从盆地边缘向中心，或从浅处向深处。
- (4) 水的数量是无限的。
- (5) 这类水的运动在初次运移中可能并不重要，但是它可以影响烃类在油藏中的封闭条件。
- (6) 这类水的运动是现在的事情，在过去地质时期中它可能发生过，也可能没有发生过。

本书主要讨论第一种类型的水——沉积来源水。

图1—2为一示意图，表示含水层中的水正在运动。在含水层的两点（A和B）测量水压，绘出与测量压力相当的假想垂直水柱，这样就得出了水柱高于基准面（在这个情况下是

海平面)的高度。它是位能高度的一个衡量标准,称为位能面或测压面。如图1—2所示,含水层中的水是从较高位能点(A)流向较低位能点(B)的。在这个例子里它是大气水。

如果将基准面取在地表,位能面高度则可用高于静水压力的过剩压力的函数来表示。因此,过剩压力也可用于确定流体运动方向。

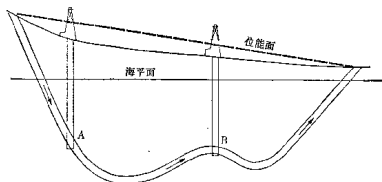


图1—2 表示由于水动力作用引起含水层中水流动的示意图

图1—3所示为一

简略的例子,其中两个含水层A和B,具有不同的位能高度。只要在两个含水层之间有通道存在,流体就会从较高位能点流向较低位能点(或从较高过剩压力点A流向较低过剩压力点B)。值得注意的是,由于B点较深,其总流体压力还是比较大的,只是其位能或过剩压力较低,所以流体从A向B流动。

如果是大气水,上述过剩压力差可由含水层供水区的高程不同而造成的。然而,如果水的流动产生在沉积物中,则沉积地层的负载应是过剩流体压力的主要原因。

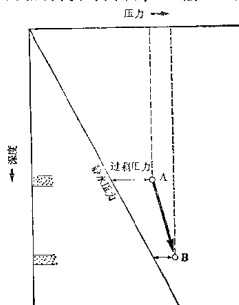


图1—3 两个含水层A与B的压力-深度略图。

箭头表示流体流动的可能方向

工程师们喜欢用术语“压力梯度”表示“压力/深度”。在异常压力带,某一个别深度的“压力梯度”值可能并不与“压力/深度”值一致。图1—4表示了这个原因。实体曲线表示地下“压力与深度”的实际关系。在A点与曲线相切的粗实线表示A点的压力梯度,而A与地表间的虚直线给出了A点的压力/深度关系。所以在A点,压力梯度与压力/深度是不一样的。

相反,在B点压力梯度切线平行于压

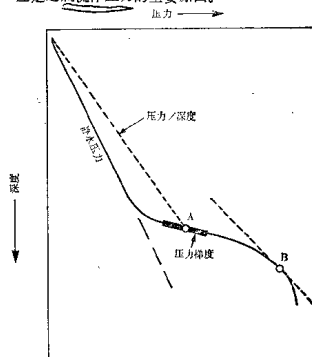


图1—4 粗略表示地下某点压力梯度和压力/深度间的不同

力—深度线，故二者数值相同。当然，整个静水压力带这两个值始终是一致的。

图1—4中解释的压力梯度在讨论地下流体运移时是重要的，而在考虑一已知深度的压力与钻井泥浆重量的关系时，则压力/深度是必不可少的。

参考文献

- Athy, L.F., 1930. Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 14: 1—24.
- Barker, C., 1972. Aquathermal pressuring — role of temperature in development of abnormal pressure zones. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 56: 2068—2071.
- Burst, J.R., 1969. Diagenesis of Gulf Coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 53: 73—93.
- Dickinson, G., 1953. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 37: 410—432.
- Evans, C.R., McIvor, D.K. and Magara, K., 1975. Organic matter, compaction history and hydrocarbon occurrence — MacKenzie Delta, Canada. *Proc. 9th World Pet. Congr.*, 3: 149—157 (Panel Discussion).
- Handin, J. and Hager, R.V., 1957. Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure: test at room temperature on dry samples. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 41: 1—50.
- Hedberg, H.D., 1936. Gravitational compaction of clays and shales. *Am. J. Sci.*, 31: 241—287.
- Hottman, C.E. and Johnson, R.K., 1965. Estimation of formation pressures from log-derived shale properties. *J. Pet. Technol.*, 17: 717—722.
- Hubbert, M.K. and Rubey, W.W., 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *J. Geol. Soc. Am. Bull.*, 70: 115—166.
- Magara, K., 1968a. Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka Plain, Japan. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 52: 2466—2501.
- Magara, K., 1968b. Subsurface fluid pressure profile, Nagaoka Plain, Japan. *Bull. Jpn. Pet. Inst.*, 10: 1—7.
- Magara, K., 1969a. Upward and downward migrations of fluids in the subsurface. *Bull. Can. Pet. Geol.*, 17: 20—46.
- Magara, K., 1969b. Porosity—permeability relationship of shale. *Can. Well Logging Soc. J.*, 2: 47—73.
- Magara, K., 1971. Permeability considerations in generation of abnormal pressures. *Soc. Pet. Eng. J.*, 11: 236—242.
- Magara, K., 1972. Compaction and fluid migration in Cretaceous shales of western Canada. *Geol. Surv. Can. Pap.*, 72—18: 81 pp.
- Magara, K., 1974a. Compaction, ion-filtration, and osmosis in shales and their significance in primary migration. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 58: 283—290.
- Magara, K., 1974b. Aquathermal fluid migration. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 58: 2513—2516.
- Magara, K., 1975a. Reevaluation of montmorillonite dehydration as cause of abnormal pressure and hydrocarbon migration. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 59: 293—302.
- Magara, K., 1975b. Importance of hydrodynamic factor — discussion. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 59: 890—893.
- Magara, K., 1975c. Importance of aquathermal pressuring effect in Gulf Coast. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 59: 2037—2045.

- Magara, K., 1976a. Water expulsion from elastic sediments during compaction — directions and volumes. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 60: 543–553.
- Magara, K., 1976b. Thickness of removed sediments, paleopore pressure, and paleotemperature, southwestern part of Western Canada Basin. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 60: 554–565.
- Magara, K., 1976c. Factors causing primary oil migration (Abstract). 1976 *Annu. Meet. Geol. Assoc. Can., Prog. Abstr.*, 1: p. 58.
- Magara, K., 1977a. A theory relating isopachs to paleo compaction-water-movement in a sedimentary basin. *Bull. Can. Pet. Geol.*, 25: 195–207.
- Magara, K., 1977b. Petroleum migration and accumulation. In: D.G. Hobson (Editor), *Developments in Petroleum Geology*. Applied Science Publishers, Essex, pp. 83–128.
- Powers, M.C., 1967. Fluid-release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration. *Bull. Am. Assoc. Geol.* 51: 1240–1254.
- Rubey, W.W. and Hubbert, M.K., 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *II. Geol. Soc. Am. Bull.*, 70: 167–206.
- Schlumberger, 1972. *Log Interpretation, 1. Principles*. Schlumberger New York, N.Y., 118 pp.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B., 1948. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, New York, N.Y., 566 pp.
- Wallace, E.W., 1965. Application of electric log measured pressures to drilling problems and a new simplified chart for wellsite pressure computation *Log Anal.*, 60: 4–10.

第二章 页岩压实作用以及剥蚀和构造时序的估算

页岩压实作用是地下物理、化学和矿物学现象的结果。然而，在世界许多地方已知：倘若流体压力接近于静水压力，或页岩接近于压实平衡，则页岩压实程度主要受埋深（或上覆负荷压力）的控制。如果流体压力高于正常静水压力，则这类页岩的压实程度将低于静水压力下正常压实的页岩。

假如所研究的地区经历了明显的上升和剥蚀，页岩的正常压实趋势与未遭剥蚀地区相比，在现在所有深度上便要向压实程度增强的方向偏移。因此，我们根据页岩压实资料就可以估算剥蚀的数量和最大埋深。

一、页岩孔隙度—深度关系

图 2—1 为一张世界不同地区的页岩孔隙度与深度关系略图。页岩孔隙度随深度增加而

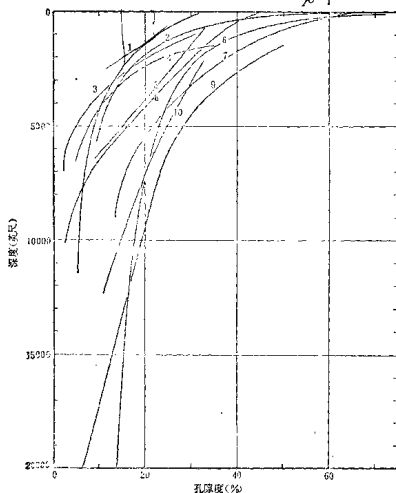


图 2—1 页岩和泥质沉积物的孔隙度与埋深关系

(据 Rieke and Chilingarian, 1974, 图17)

1—普罗士基科夫 (Proshlyakov, 1960);

2—米德 (Meade, 1966);

3—厄登 (1930);

4—霍索伊 (Hosoi, 1963);

5—黑佐伯格 (1936);

6—迪金森 (1953);

7—惠利 (1963);

8—韦勒 (Weller, 1959);

9—汉 (Ham, 1965);

10—福斯特与韦伦 (Foster and Whalen, 1966)

降低。孔隙度降低的速度在浅处快，在埋深较大处减缓。正如上面所提到的，地下流体压力也可以影响页岩孔隙度；在一已知埋深处或一已知上覆负荷压力下，流体压力越大，则孔隙度越高。因此，图2—1中的许多孔隙度—深度曲线，特别是那些在深处显示较高孔隙度数值的，可能是流体压力高于正常（静水）压力的结果。鲁贝与哈伯特（1959）曾提出一个表示正常压实趋势的，或压实平衡条件（流体压力为静水压力）下的、页岩孔隙度与深度的如下指数函数关系：

$$\phi = \phi_0 e^{-cz} \quad (2-1)$$

式中 ϕ ——深度 z 处的页岩孔隙度值；

ϕ_0 ——地表（ $Z=0$ ）页岩的孔隙度；

e ——自然对数的底；

c ——固结常数（长度 $^{-1}$ ）。

c 值是画在半对数纸上的（孔隙度为对数座标，深度为算术座标）正常压实趋势的斜率大小。这个方程式的根据是厄赛（1930）由俄克拉何马州北部宾夕法尼亚纪和二叠纪页岩得出的曲线。鲁贝和哈伯特按该页岩在沉积后所经历的时间，认为厄赛的曲线关系是最接近于压实平衡条件的一种关系。厄赛曲线的 ϕ_0 和 c 值分别确定为0.48（或48%）和 $-4.33 \cdot 10^{-4}$ 英尺 $^{-1}$ 。

虽然孔隙度—深度曲线的较深部位常常受到高于正常的流体压力的影响，而在大多数年青沉积盆地的较浅层段中，通常发育的仍是正常压实趋势。真柄（1971）根据迪金森在湾岸地区作出的曲线，指出那里7000英尺以上页岩的孔隙度与深度之间成指数关系（正常压实）。

为了估算被剥蚀掉的沉积岩厚度，可以利用页岩孔隙度正常趋势的偏移。但是，常常没有孔隙度值的资料，而页岩的其它压实资料，例如从声波测井曲线得出的资料，通常是可取得的，因此，可以更经常的利用这些资料。

二、页岩传播时间—孔隙度关系

瓦利等人（Wyllie et al, 1956, 1958）依据大量试验室的实验结果推断，在具有均匀分布的小孔隙的固结地层中，孔隙度与传播时间之间存在有一线性关系：

$$\Delta t_{\text{测井}} = \phi \Delta t_{\text{水}} + (1 - \phi) \Delta t_{\text{骨架}} \quad (2-2)$$

或：

$$\Delta t_{\text{测井}} = (\Delta t_{\text{水}} - \Delta t_{\text{骨架}}) \phi + \Delta t_{\text{骨架}} \quad (2-3)$$

式中 $\Delta t_{\text{测井}}$ ——声波测井曲线上的传播时间（微秒/英尺）；

$\Delta t_{\text{水}}$ ——地层水的传播时间（微秒/英尺）；

$\Delta t_{\text{骨架}}$ ——岩石骨架的传播时间（微秒/英尺）。

地下纯石英砂岩的 $\Delta t_{\text{骨架}}$ 与 $\Delta t_{\text{水}}$ ，通常分别采用55.6和189~200微秒/英尺。方程2—2或2—3意味着在均一岩性的岩石中，传播时间随孔隙度的加大而增长。

页岩孔隙度与声波传播时间的关系是通过蒲原（Kambara）GS-1井的常规岩芯和声波测井曲线资料发现的（真柄，1968），该井钻穿了日本第三系岩石。表2—1列出了岩芯分析和传播时间的资料。页岩孔隙度与传播时间的关系表示在图2—2中。