

泥质沉积物 的压实

HERMAN H. RIEKE, III
GEORGE V. CHILINGARIAN 著

地质出版社

泥质沉积物的压实

HERMAN H.RIEKE, III
GEORGE V.CHILINGARIAN

著

徐 怀 大 译

地 质 出 版 社

Compaction of Argillaceous Sediments

H. H. Rieke, III

G. V. Chilingarian

泥质沉积物的压实

Herman H. Rieke, III 著
George V. Chilingarian

徐怀大 译

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑：马志先

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：16¹/₂ 字数：381,000

1984年5月 北京第一版·1984年5月 北京第一次印刷

印数：(1—2880)册 定价：2.55元

统一书号：15038·新945

序 言

常有这样的书，它既容易领会又包含了大量和某一特定专题有关的资料。H. H. Rieke, III 和 G. V. Chilingarian 所著《泥质沉积物的压实》就是这样一本专著。这是一本先进的著作，它是特地为教师、研究人员、工业科学家以及大学生们写的，他们是在苦心孤诣地研究细粒沉积物，以及粘土、粉砂和有关细结构物质转变为沉积岩的压实过程。与沉积物的沉积作用和随后的压实作用有关的大量实际资料以及相应的解释，都已经收编到这本佳作中。两位作者成功地把浩瀚的不同来源的资料综合到一本精心编排的书中。书中还增添了作者自己广泛研究中所获得的许多实际材料。对于那些关心泥质和有关沉积物压实作用的影响和结果等研究领域的地质学者和工程师们，本书将提供许多答案。此外，对于进一步的研究和探索，本书也将是促进和启发思考的一个借鉴。对于地质文献来说，这本书是个值得推崇的补充，因为它不仅总结了数百名研究人员的重要而明确的成果，而且也提出了作者的观点。他们两位是懂行的、年青的、生气勃勃的细粒沉积物以及使这些物质变为沉积岩的压实作用方面的学者。本书对所认真撰写的八个章节中提出的材料作了很好的组织。

在绪论一章中，Rieke 和 Chilingarian 教授简捷地向读者介绍了这个有意义的研究领域，并且讨论了泥质沉积物的成分。在大家可以理解的限度内，还提出了某些基本的流体机理概念，并且评述了流体静态的问题。接着讨论流畅地进行着并很快转到压实作用机理的议题，并用压实方面的实验室和现场资料加以确证。之后，作者回顾了与压实作用有关的泥质沉积物的成岩—变质作用过渡相和性质。继而是介绍间隙流体、沉降作用和异常流体压力。在这精心安排的绪言一章之后，Rieke 和 Chilingarian 把他们的读者带进一个引人入胜的相互关系的讨论之中，即现代和古代沉积物的密度、孔隙度、残余含水量、压力和深度之间的相互关系。作为现场和实验室内实验确定的结果，书中提出了现代沉积物（软泥和粘土）的压实结果，并且利用客观的实际资料、以图表形式作了绝妙的论证。这不仅是这一章，而且是泥质沉积物压实一书所有其它章节的一个不可分割的重要组成部分。在感兴趣的读者面前，作者成功地提供了论证他们主要论点的大量实际资料。

由 Leons Kovisars 博士评述的第三章向读者提供了有关压实页岩中的应力状态和固结理论的见解，同时提出了压力—深度—密度之间关系的分析。另外一个卓著的成就是差异压实的讨论和对曾经存在于泥质沉积物中的最大有效压力的估算。在第四章中作者极其透彻地论述了压实作用对细粒沉积物各种特性的影响。

第五章以充分的论据讨论了压实过程中隙间流体的化学变化和特性。在有关隙间溶液的成分和分类，影响隙间水化学成分的各种作用以及流体释放机理诸方面提出了新的丰富的资料。关于在压实过程中，压实作用对粘土挤出溶液化学性质的影响，作者从理论和实验途径两个方面作了精心的处理。我们怎样才能知道孔隙水对成岩变化的影响呢？第五章给出了回答这个复杂问题的透彻的和反映最新成就的讨论。这一章还深入研究了石油和沥青从软泥和页岩中排出的情况。然而，作者指出，在这个领域中还有大量的研究工作有待去

做。

以细粒沉积物占优势的一个沉积中心的沉降作用，以及这些细粒结构物质的最终压实情况是当今世界上大量著述中的一个常被忽视（或者是回避）的主题。然而，Rieke 和 Chilingarian 却用整个第六章专门论述了这个命题，他们充分地论述了这样一些问题，诸如沉积盆地和地槽的成因，还涉及到水文地质旋迴，由于排出流体而引起的沉降作用，以及沉降作用的数学分析。的确，在笔者的评价中，仅仅这一章，就充分证明这本书的出版是完全值得的。随着读者认真读了第七章，他也就开始参与了异常地压研究方面的一项惬意而有益的活动。作者讨论了由于压实、断层、压实过程中矿物的相变以及许多别的原因而引起的异常地压。他们还解剖了一个高压带。“超压”带的赋存曾经引起人们对压实作用机理的巨大兴趣，这些“超压”带给美国墨西哥湾和世界上许多别的地方钻井工程中带来了很大难题。

在最后第八章中，Rieke 和 Chilingarian 就压实研究中使用的设备和技术为读者提供了一详尽的论述。在这点上，读者将会体会到，他们的藏书由于有了这本不寻常的和杰出的专著而增色不少。它不是一个单一的判读经验，而是作为提供与细粒结构沉积物（诸如粘土和粉砂）的压实作用有关的必需数据的一个来源。地质这一行从事于形成沉积岩的沉积物压实和石化作用的永无止境的研究；同时因为页岩和有关的沉积岩构成了地球表面上如此巨大的岩体，以致他们要求研究训练的严密性。如果人们去开采更多的做为能源的油、气和煤，这个要求就更迫切了。各种各样的油页岩是油母质（干酪根）的仓库（例如犹他州、科罗拉多州和亥俄明州的绿河组页岩），不可避免地，总有那么一天必须去开发利用它们。压实作用对这些以及许多其它沉积物有什么影响？通过研究它们，人们能够得出什么样的合理推论呢？请阅读Rieke和Chilingarian 编著的令人满意而有启发性的《泥质沉积物的压实》。对于所提出的问题它可能无法提供全部答案，但是却在这一正确方向上迈进了一大步。

犹他州普罗沃

布赖姆扬 (Brigham Young) 大学

H. J. BISSELL

目 录

序言

第一章 绪论	1
泥质沉积物的成分	2
某些基本的流体机理概念	3
流体静态的基本方程	3
浮力	4
压实机理	5
压实方面的实验室和现场资料	9
成岩作用—变质作用过渡相	11
与压实作用有关的泥质沉积物性质	12
间隙流体	12
关于压实作用排出液的化学性质的实验资料	13
沉降作用	16
异常流体压力	17
第二章 密度、孔隙度、残余含水量、压力和深度之间的相互关系	20
简介	20
密度—深度—压力关系	20
现代沉积物和页岩密度随深度的变化	23
孔隙度—密度关系	25
孔隙度—深度关系	26
孔隙度随深度的变化	27
碳酸盐含量对孔隙度的影响	32
现代沉积、软泥和粘土的实验性压实	33
粘土、胶和硅酸的性质和脱水程度	33
粘土的水化	35
硅酸的水化	36
残余含水量和压力的关系	37
碳酸盐沉积物压力和孔隙度间的关系	43
含水量与时间的关系	46
压实参数的计算	48
间隙水中各种电解质对压实作用的影响	50
第三章 压实作用机理和压实作用模型	55
简介	55
固结作用的理论	55
处于压实中的页岩内的应力状态	59

总应力场的解	60
静水应力状态	61
偏应力状态	61
总应力张量	61
积土应力的变化	62
计算由积土负载引起的剪切应力	63
应力幅值及方向的计算	64
压力—深度—密度的关系	66
孔隙度—深度压实模型	68
Athy的压实模型	68
Hedberg 的压实模型	69
Weller 的压实模型	70
Power 的压实模型	70
Teodorovich和Chernov 的压实模型	71
Burst 的压实模型	71
Beall的压实模型	72
差异压实作用	74
计算一个泥质沉积物中曾经存在过的最大有效压力	76
第四章 压实作用对泥质沉积物某些性质的影响	79
简介	79
粘土中孔隙大小分布	79
泥质沉积物遭受压实时显微构造的变化	82
用于压实研究中的X射线衍射技术	85
不同温度和增高压力下粘土矿物中的晶体构造变化	86
地开石 (API 15号)	87
埃洛石 (API 12号)	87
锂蒙脱石 (富镁蒙脱石) (API 34号)	88
蒙脱石	88
二氧化硅	90
渗透率	91
比存储率	94
已压实粘土的渗透率	94
渗透率和孔隙度的关系	97
泥质沉积物的流变性质	99
流变模型	100
泥质沉积物的弹性和强度	103
未固结的和硬化的沉积物的弹性	103
弹性模量	105
弹性模量 (杨氏模量)	106
体积模量	109
刚性	109
泊松比	110

孔隙流体对弹性的影响	111
泥质沉积物的强度性质	111
剪切强度	111
压缩强度	111
粘土的强度和结构(定向性)间的关系	113
泥质沉积物的压缩性	114
残余含水量、空隙比、压缩率之间的关系	115
压缩率的实验资料	118
干粘土的压缩率	125
干粘土、水化粘土及砂的压缩率间的比较	130
温度对压缩率的影响	132
蠕变	133
有限应变	134
压缩指数随压实的变化	135
固结系数	137
美国弗吉尼亚东南部约克河现代沉积中物理性质随深度的变化(实例)	137
第五章 压实过程中间隙流体的化学变化和特性	141
简介	141
间隙溶液的分类	142
间隙溶液成分与海水成分的关系	143
各种盐类和离子的溶解度和迁移率	144
影响间隙水化学成分的各种作用的简评	145
粘土颗粒—流体之间的界面	148
双层理论	148
Helmholtz 双层模型(刚性双层)	148
Gouy 双层模型(扩散双层)	148
Stern 双层模型(综合双层)	149
电成岩作用	149
重力和温度在形成古卤水中的作用	150
流体释放机理	150
半渗透隔膜、渗滤与反渗透	150
半渗透粘土隔膜的电化学	151
粘土矿物的成岩变化	153
化学胶结作用	154
压实作用对粘土和软泥中挤出溶液的化学性质的影响—实验室数据 和理论分析	154
孔隙水成岩变化的简单小结	167
海相沉积物的早期成岩变化	167
沉积物的后生成岩变化	163
与硅酸盐有关的某些化学变化	169
间隙水中Ca/Mg比的某些变化	170
微生物对地下水化学成分的影响	171

间隙流体的水化学相和化学成分的垂向变化	171
砂岩和伴生页岩中的盐度分布	176
软泥和页岩中油和沥青的排出	178
压实作用是石油初次运移的可能起因	178
作为石油运移动力的温度梯度	179
溶解在原油中的油田水化学性质	180
原油中痕量元素与伴生页岩的关系	180
第六章 沉降作用	181
简介	181
沉积盆地和地槽的成因	182
水文地质旋迴	185
由于流体排出的沉降作用	186
近地表沉降	190
沉降作用的数学分析	190
Jacquin—Poulet计算机模型	191
深度—时间关系	192
粘土中的水流	192
第七章 异常地压	195
简介	195
异常地压的成因	198
由异常地层压力起因的压实作用	199
快速加载和连续沉积作用	200
超压地层的断层起因	206
压实过程中矿物的相变	207
石膏—无水石膏的转换	207
粘土矿物的脱水作用和转换作用	208
粘土矿物成岩作用	210
异常压力的形成和保持	212
盐和页岩刺穿	215
构造压挤	216
渗透压力和扩散压力	217
地热温度变化	219
一个异常流体压力层的剖析	221
根据测井曲线计算异常压力	224
第八章 压实现象研究中所用的设备和方法	226
压实设备的发展	226
1930年以前的压实研究	226
1930年以后仪器的进展	228
压实装置的分类	232
固结测量仪	233
压滤器	236

线性活塞仪器	237
高压双活塞压实仪器	242
三轴和静水压力压实装置	244
校准单轴压实仪器的某些特点	247
高压线性活塞装置的校准	247
极高压力装置的校准	250
附录A: 换算系数	252

第一章 绪 论

沉积物由于它本身重量的影响所导致的压实作用是一个早就知道的地质现象。正如 Hedberg (1926) 所指出的, 早在十七世纪, Steno 就认识到沉积地层体态上的变化可能是压实作用引起的。Sorby (1908) 在他的题为“定量方法在研究岩石构造和历史上的应用”的杰出论文中, 提出了天然沉积物的孔隙度的原始资料, 识别出孔隙度与年代之间存在反比关系。并且认识到沉积物的压实作用主要是孔隙度上的变化。压实作用的构造效果是 Shaw 和 Munn (1911) 提出来的, 而 McCoy (1934)、Shaw (1918) 和 Mehl (1919) 支持过沉积物的压实作用在油田构造生成上可以起一部分作用的设想。1926年, Hedberg 试图定量估算沉积物的压实。他的著作引起了人们的巨大兴趣, 并启发人们对这一课题的进一步探索。Nevin (1931) 提出过一份关于截至1931年已有的沉积物压实的地质资料的出色讨论。Blackwelder (1920)、Monnett (1922)、Lahee (1923)、Teas (1923)、Terzaghi (1925)、Hedberg (1926, 1936) 和 Athy (1930a) 曾经提出过沉积物沉淀和重力以及其它压实理论上的早期地质解释。重力压实作用的定义是由于积土负载 (overburden load)^①引起的垂直压缩应力和剪切压缩应力造成沉积剖面中孔隙流体的排出和孔隙体积的减小。差异压实作用 (differential compaction) 指的是一座潜山或者一个礁块那样的一种潜伏正地形上面和周围的沉积物的重力压实现象。本书涉及的是泥质沉积物的压实现象, 粗粒沉积物的压实作用在行将出版的《Developments in Sedimentology》丛书后续集中登载。

按照 Leigh 大学海洋土工技术实验室主任 Adrian F. Richards 的意见 (个人通讯, 1971), 地质界广为采纳的看来是固结作用 (consolidation) 这个词, 因为工程师们决不会把压实作用这个词当作固结作用的同义词来使用的。涉及到固结作用的基本定律是土壤力学的那些定律。然而本书作者选择了压实作用而没选用固结作用, 因为许多地质学家把后一名词理解为包括胶结作用在内的一种成岩作用。

和泥质沉积物的压实、埋藏和成岩作用相伴而生的是粘土矿物的成因。构成泥质沉积物的粘土矿物的起源归结为三种主要作用: (1) 从先已存在的岩石和沉积物继承下来的碎屑; (2) 由于它们在低温下和不同的 pH 和 Eh 范围内的不稳定性, 在沉积环境中从一种粘土转变为另一种粘土; (3) 就地新生的粘土矿物。后两个作用是很复杂的, 在目前很难评价压实作用在造成有利于粘土矿物变化的环境上的准确作用。在本书中转变作用 (transformation) 这个词, 是用于粘土矿物从一种类型改造为另一种类型的那些变化; 而新生作用 (neoformation) 用于从非粘土矿物形成粘土矿物以及就地合成粘土矿物上。

① Overburden 原意超载, 指上覆沉积物 (包括其中的水) 的负载, 土力学中译作积土压力。Load 原意负载。本书中一般译作积土负载。有时, 为了明确起见, 也译作上覆沉积物负载或上覆负载——译注。

泥质沉积物的成分

泥质沉积物中最重要的它生 (allogenic) 成分包括: (1) 各种粘土矿物, 包括三水铝石, (2) 石英, (3) 长石, (4) 碳酸盐, (5) 非晶质氧化硅和铝土, (6) 火成碎屑物质和 (7) 有机物质。正如Müller (1967) 所指出的那样, 形成于盆地本身的生物成因物质包括碳酸盐、非晶质氧化硅和有机物质。

大西洋中粘土组分 ($<2\mu$) 的主要部分是由伊利石、高岭石、绿泥石、蒙脱石、杂乱的混层矿物 (指结构上呈层状、但各层的矿物成分不同的粘土矿物——译注) 和三水铝石组成的。照例, 伊利石是主要的粘土矿物, 而在北大西洋, 它们构成了90%以上的粘土矿物组分 (Biscayne, 1964)。在南大西洋, 蒙脱石的总量占全部粘土矿物组分的40%, 而在北大西洋地区只有20%的粘土组分是蒙脱石。在印度洋的西南地区, 蒙脱石的成分超过粘土组分的80%, 这可能是由于火山物质的成岩转变作用造成的 (Biscayne, 1964)。

在邻近南美和非洲热带河流的大西洋的沉积物中, 高岭石 (高达50%以上) 和三水铝石 (10%以上) 的含量大为增加。在马达加斯加周围的印度洋沉积物中, 三水铝石的含量很高, 达30%以上。绿泥石含量一般不到粘土矿物组分的20%; 然而, 在南极地区以及纽芬兰岛外, 却发现了大量绿泥石。根据Biscayne (1964) 的意见, 大西洋中脊以东没有混层矿物。在大西洋中脊以西, 这些矿物的出现频率从北向南逐步降低。

根据Griffin和Goldberg (1963) 的意见, 伊利石、蒙脱石、绿泥石、高岭石和很少的埃洛石, 是太平洋的主要粘土矿物。采自北太平洋区的全部样品中都找到过有丰富的伊利石。高岭石局限于近岸沉积。在近岸沉积中, 蒙脱石一般也比较丰富。近岸沉积中的绿泥石含量随纬度的增加而增加。

南太平洋区最丰富的粘土矿物是蒙脱石 (主要是绿脱石), 它和钙十字沸石伴生。伊利石、高岭石和绿泥石不太丰富。

现代海洋和淡水泥质沉积物的大多数样品含有2—5%的有机质。这种有机质主要由化学成分未定的“有机残余物” (60—80%) 组成, 外加不到10%的氨基酸 (Degens, 1967)。

Holmes 和 Hern (1942) 鉴定了密西西比河及其支流所沉积的现代冲积物中的伊利

表 I 各种粘土矿物的物理性质和特点

(据Warner, 1964, 14页)

性 质 或 特 点	粘 土 矿 物		
	高 岭 石	伊 利 石	蒙 脱 石
晶胞厚度(Å)	7	10	9.6
粘土片*厚度(Å)	500—20,000	>30	10—80
表面积(米 ² /克)	≈15	≈90	800 (理论值)
表面直径(μ)**	0.3—4	0.1—0.3或更大	0.01—0.1
密度(克/厘米 ³)	2.60—2.68	2.64—2.69	2.2—2.7
阳离子交换能力 (毫克当量/100克)	3.15	10—40	80—150
形状	六方形	六方形(?)板状或板晶	板状(?)

* 或指晶体构造层——译注。

** 1μ (微米) = $10,000\text{Å}$ (埃, 光线或辐射线波长单位, $=10^{-10}$ 米)

石、蒙脱石和高岭石的含量：在东支流，分别为60—75%，10—15%和10—20%；密西西比河则分别为40—60%，10—45%，和5—15%；在西支流，分别为40—60%，20—45%和10—20%。大量的页岩和泥岩的分析也表明，伊利石通常是最丰富的粘土矿物；普遍出现的高岭石和蒙脱石粘土构成50%以下的粘土矿物组分。

由于不同类型粘土颗粒的厚度（单位晶胞的厚度或结晶构造层厚度——译注）和形状影响到它们在压实过程当中的习性，所以表1中列举了各种粘土矿物的物理性质和特性。

大多数泥质软泥的原始含水量约为50—80%，它相当于70—90%的孔隙度（Müller, 1967, 135页）。相反，在砂子中，孔隙度只有30—50%，它相当于20—30%的含水量。按Serruya (1969) 的意见，日内瓦湖柠檬色沉积物的上部200厘米以干重为基数计算平均含有大约150%的水。当在未经扰动的样品上测定时，最上边第一层沉积物的含水量达250%。

某些基本的流体机理概念

流体静态的基本方程

流体静态的基本方程是说压力随深度而增加，每单位长度的这种压力增量等于单位体积的重量（Binder, 1962, 13页）：

$$dp = -\rho g dz \quad (1-1)$$

式中 dp 为压力增量； dz 为深度增量（ z 是量得的垂直距离，在压力降低方向为正值）； ρ 为密度（单位体积的质量）； g 为重力加速度。负号指示压力随 z 值增加而降低。检验图1可

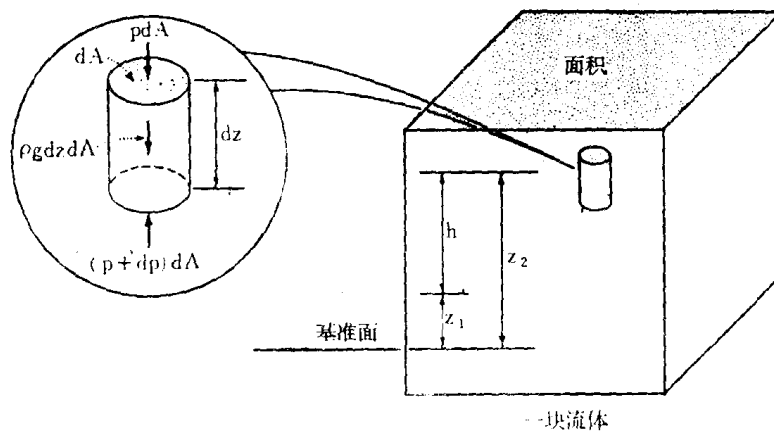


图1 作用于任意一块流体中一个无穷小单元上的垂直力示意图

（据Binder修改，1962，图2-2，13页）

以很清楚地理解上述关系，图中表示了在一静态流体中一无穷小单元（infinitesimal element）上的垂直力。在这个图中， dA 代表一无穷小截面积， p 为此无穷小单元顶面上的压力，而 $(p + dp)$ 为其底面上的压力。因为压力由于流体重量而增加，所以单元的重量（ $\rho g dz dA$ ）和由压力差而产生的力（ $dp dA$ ）相平衡：

$$dp dA = -\rho g dz dA \quad (1-2)$$

或者：

$$dp = -\rho g dz$$

取积分形式，上式可以表示如下（见图1）：

$$\int_1^2 \frac{dp}{\rho g} = - \int_1^2 dz = -(z_2 - z_1) \quad (1-3)$$

如设 ρ 为常数，则式1-3变为：

$$p_2 - p_1 = -\rho g(z_2 - z_1) \quad (1-4)$$

或：

$$\Delta p = \gamma h \quad (1-5)$$

式中 h 为两点间的深度差，通常把它当作“压头”；而 $\gamma (= \rho g)$ 为比重。当 γ 以磅/英尺³表示 h 以英尺表示时，压差 Δp 为磅/英尺²。

浮 力

当一物体完全或者部分地浸没于一静态流体中时，有一个向上的垂直浮力作用于此物体，其大小等于所排替流体的重量。这个力是流体作用于这个物体的全部力量的合力。在浸没较深的流体部分上面的压力比较大。在浸没物体不同点上的压力与物体的物质成分无关。例如，如果用同样的流体去替换被浸物体，这个流体将保持不动。这意味着作用于被替换流体的向上的浮力等于它的重量。

如果浸没物体处于静态平衡状态，则浮力和物体的重量大小相等而方向相反地通过物体的重心。有关流体静力学的广泛论述，读者可以参阅Binder（1962）的关于流体力学方面的出色的专著。

图2说明了浮力原理。一个体积1英尺³比重162.24磅/英尺³（比重=2.6）的固体在

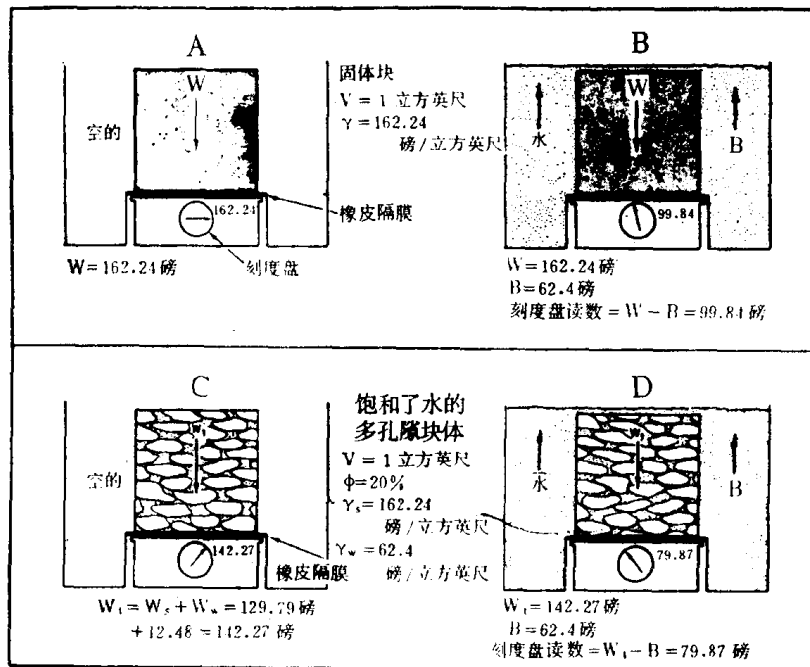


图2 浮力对固体以及充满了水的多孔隙物质重量的影响图解

W —重量（磅）； B —浮力（磅）； V —体积（英尺³）； γ —比重（磅/英尺³）； ϕ —孔隙度； t —总计； s —固体； w —水。容器内固体块放在橡皮隔膜顶面上，反过来橡皮隔膜又坐落在秤盘上

秤的刻度盘上记录的重量为 162.24 磅 (图 2A)。如果此容器充满水, 其向上作用的浮力将等于所排替的流体的重量 ($=62.4$ 磅), 因此刻度盘上记录的重量将等于 99.84 磅 ($=162.24-62.4=99.84$ 磅), 如图 2B 所示。

如果一个孔隙度为 20% 的孔隙介质饱和以水, 且其固体颗粒的比重等于 2.6, 则刻度盘上记录了固体颗粒和流体重量之和, 亦即 $2.6 \times 62.4 \times (1-0.20) + 62.4(0.20) = 142.27$ 磅 (图 2C)。容器内装以水记录的重量等于 $142.27 - 62.4 = 79.87$ 磅, 亦即向下作用的饱和水的孔隙介质的重量 (142.27 磅) 减去浮力 (62.4 磅), 此浮力向上作用, 并且等于被排替的流体的重量。

后一实验还证明了阿基米德原理可以用到地下的多孔隙岩石上。由于孔隙压力引起的浮力与表面孔隙度不成正比, 而流体压力 P_f 在通过这个系统的任何表面的整个面积上都是有效的, 而不受在该空间内的被固体充填部分所占的分面积的影响 (见 Laubscher, 1960, 和 Hubbert 及 Rubey, 1960 的讨论)。

压 实 机 理

根据 Rowell (1965) 的意见, 页岩中有两种孔隙度: (1) 晶间孔隙度 (intercrystalline porosity), 它构成了粘土颗粒之间的空隙, 并直接取决于粘土颗粒的定向和填集程度; (2) 晶内孔隙度 (intracrystalline porosity), 它是由粘土矿物的外部和内部表面上的结合水 (bound water) 体积构成的。晶内孔隙度取决于粘土矿物的表面积和包着它的水层厚度。这个厚度取决于这个表面上可以交换的阳离子的存在, 这种表面趋向于水化, 并形成一种电双层 (electric double layer)。

例如, 具有一 80% 原始孔隙度的泥质软泥在压实过程中经受一显著的物理变化。随着埋藏深度的增加, 孔隙度有一连续的降低。在到达大约 500 米深度以前, 这种现象发生的很快, 在这个深度以下则比较缓慢。Müller (1967) 曾经提出过泥质沉积物成岩作用的一篇出色的讨论。成岩作用 (diagenesis) 这个词通常用于新沉积的沉积物中在它达到变质作用阶段之前发生的全部变化。然而作者认为: 许多沉积中心的地球表面, 在温度和压力没有大规模变动的情况下, 这里的新鲜沉积物转变为基本上硬化的稳定岩石的所有作用, 应称为成岩作用。继石化作用之后但在变质作用之前发生的所有变化, 都定名为 外成作用 (epigenetic) 或者 退化作用 (catagenetic)。

按 Müller (1967) 的意见, 在大约 500 米深度下面 (深埋阶段), 孔隙度的减低方面只有粒度, 粘土矿物成分和温度起着主要作用。在这个深度上, 沉积物的总体积减少大约 50%, 而粘土软泥 (clay mud) 随着孔隙度减少大约 30% 变成一种泥岩 (如易剥裂, 即为页岩)。随着孔隙度的进一步降低, 这种泥岩变成了孔隙度只有大约 4—5% 的一种泥质板岩。板岩是变质作用的产物。

相反, Millot (1949) 把 泥质板岩 定义为大部分由一种或者几种粘土矿物组成的, 并且没有明显层理的一种常见的岩石, 而把 页岩 这个词当作成层的泥质板岩。然而, 在显微镜下的岩石薄片鉴定上, 有些所谓的 泥质板岩 显示了清晰的层理; 这就提出了一个命名的问题。很多地质家宁愿取 泥岩 这个词而不用 泥质板岩 这个词。

随着沉积物堆积在海底上, 下伏的地层便受到压实。如果间隙水能逸出, 它们和上覆

沉积物中的水相混合，并最终导致与海水相接触。因此，在任意点上的流体压力都是静水压力。随着压实作用的发生，孔隙度降低了。另一方面，如果间隙水的逸出受到抑制，基质不可能更紧密地填塞，则其孔隙度和流体压力将异常地高。

在一泥质层中由于积土应力而引起的空隙体积减小取决于下列因素：（1）岩性，（2）原始厚度，（3）最大有效应力，（4）加载（loading）速度，（5）有机物质的分解，和（6）粘土矿物的再结晶作用和转变作用。此外，Meade (1968) 列举了在施加负载情况下影响泥质沉积物的含水量的因素如下：（1）颗粒大小，（2）粘土矿物类型，（3）吸附的阳离子，（4）间隙电解质溶液，（5）酸度，和（6）温度。因为水—粘土的关系的密切，粘土的孔隙体积随积土压力的增加而降低现象，通过水体的移动可很好的加以分析。粒度、粘土矿物、吸附阳离子和间隙电解质溶液的影响示于图 3。沉积物的压实主要是通过继间隙流体的排出之后孔隙空间的减小来完成的。有机物的分解和粘土的再结晶和转变作用可能也起着重要作用。

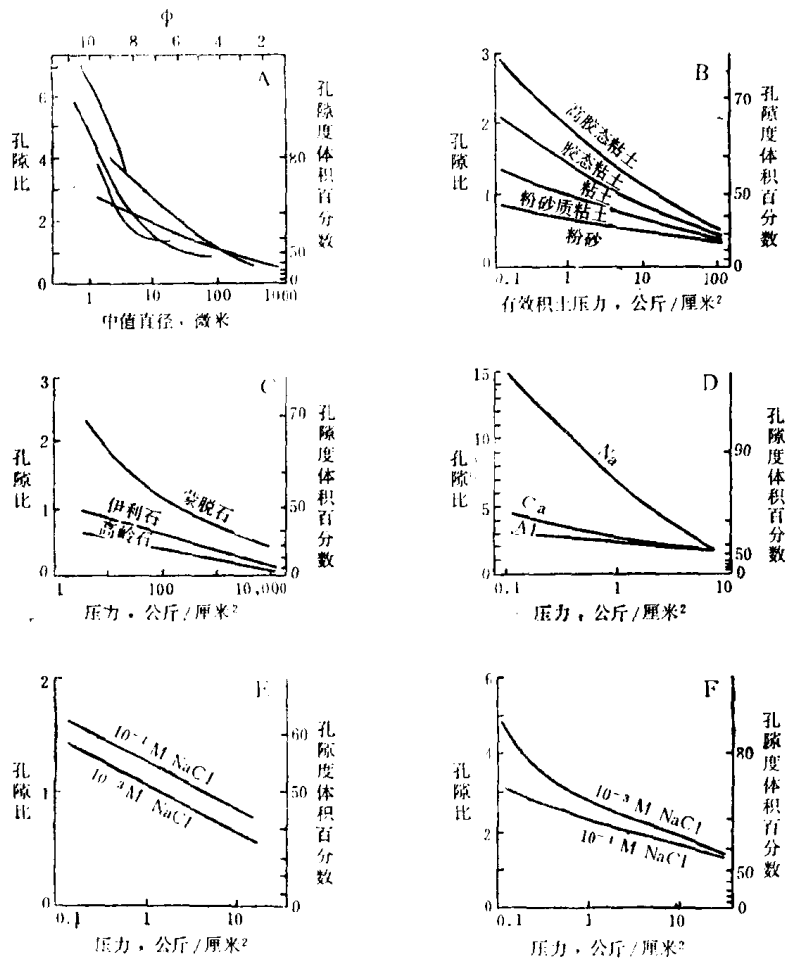


图 3 不同因素对粘土物质中的空隙比和压力间的关系的影响

A. 积土压力小于 1 公斤/厘米² 情况下空隙比和中值粒径间的关系 (据 Meade, 1964, B6 页)。B. 粒度的综合影响 (据 Skempton 修改, 1953, 55 页)。C. 粘土矿物种类的影响 (据 Chilingar 及 Knight 修改, 1960, 104 页)。D. 被蒙脱石吸附的阳离子的影响 (据 Samuels 修改, 1950)。E. 在未分级的伊利石中 NaCl 浓度的影响, 其中约 60% 的粒度大于 2 微米 (据 Mitchell 修改, 1960, 图 M 3)。F. 细于 0.2 微米的伊利石中 NaCl 浓度的影响 (据 Bolt 修改, 1956, 92 页) (据 Meade, 1968, 图 1, D4 页)

泥质沉积物中的有机质体积通过两种基本作用而减小：（1）由水和挥发气体如甲烷和二氧化碳的释放而造成的有机质分解；和（2）有机质的物理压实。观察表明，富于有机质的软泥比普通软泥的孔隙多，而在高压下的碳质页岩比普通页岩更为压实和具较小的孔隙度（Weller, 1959, 301页）。植物物质早期转变成泥炭和以后转变为褐煤，伴随以层厚极大的减薄。Falini (1965, 1335 页) 估算过这种层厚的减薄，当泥炭转变为褐煤时，厚度大约会减薄 10 倍（最终厚度=原始厚度的十分之一）。随着植物物质中非有机杂质的增加，由挥发作用引起的体积损失百分比将会降低；在所有情况下，都会有少量挥发残余物残留下来（Hedberg, 1926, 1038 页）。上覆地层的重量挤出孔隙空间中的水和气。部分分解的有机质和某些这种分解产物，看来是形成一种复杂的水凝胶系列，由于它们的存在引起了其它岩性中不存在的一些复杂问题（Weller, 1959, 301页）。

正如 Weller (1959, 304 页) 所指出的那样，时间是煤化作用中的一个重要因素。只有极少数古生代煤没有跻身于沥青的行列，而大多数第三纪的煤都曾经通过亚沥青阶段（sub-bituminous stage）。比其它沉积物成岩作用所可能获得的标志来说，煤的变质级别的指示标志能对煤的不同成岩阶段作出更可靠的评价。Weller 认为无烟煤级的煤，不可能仅仅是埋藏的结果，因为这些煤层总是伴随以侵入的火成岩和变形活动。Teichmüller 和 Teichmüller (1967, 400 页) 指出过，如果地热温度大于 50℃，煤的变质级别随深度而增加。高地热温度加速了地球化学的煤化作用。短期间的强力加热和比较长时期的低温加热可以取得同样的效果。因此，如果煤的加热时间已知的话，煤的变质级别只是温度的标志（Teichmüller 和 Teichmüller, 1967）。应当注意，尽管煤常常和厚层页岩层系以及含油砂岩相伴生，但是沥青物质是遵循一种不同的成岩途径，这种途径导致了油气的聚集。

在检验粘稠软泥（水中粘土悬浮液）时，作者观察到粘土小片的下列排列方式（见图 4）：（a）非絮凝分散状（deflocculated-dispersed）排列（或完全分散、不集结排列）；（b）具角对面接触的非絮凝状排列（deflocculated with edge-to-surface contacts）（角带正电荷，而面带负电荷）；（c）絮凝一分散状排列（flocculated-dispersed）（或集结但不絮凝的）；和（d）具角对面接触的絮凝状（或集结）排列。

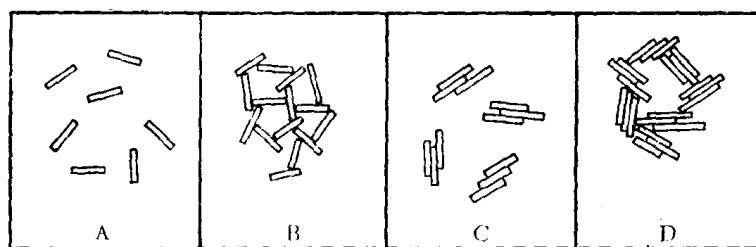


图 4 在粘稠的水中粘土悬浮液中小粘土片的可能排列方式

A. 非絮凝分散状。B. 具角对面接触的非絮凝状。C. 絮凝分散状。D. 具角对面接触的絮凝状

由于压实过程中孔隙体积减小的结果，粘土颗粒彼此更移近。因为粘土矿物颗粒所特有的板状，最容易形成的排列方式是一种优选定向（图 5 A）。图 5 B 表示另一种可能的填集排列方式，Aylmore 和 Quirk (1960, 1046 页) 称之为乱叠层（turbostratic）定向排列。在后一种情况下，在粘土颗粒的小捆（packets）或组构域（domain）内，片状定向