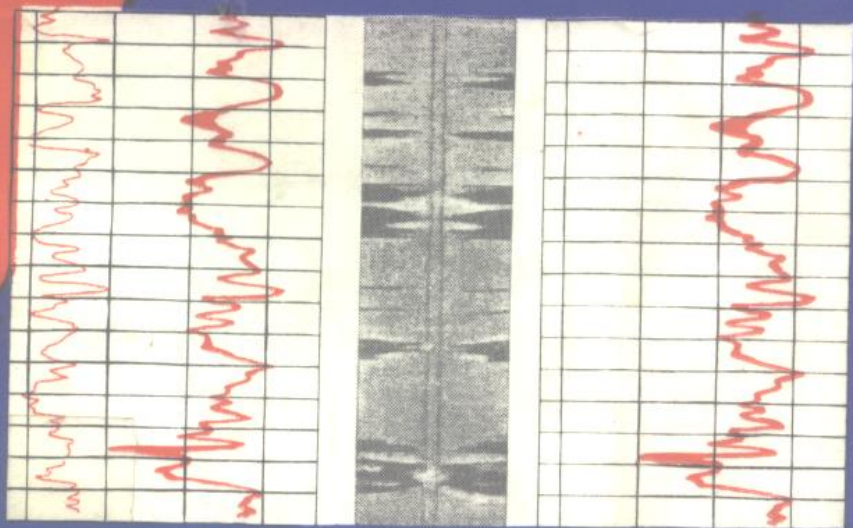


地震资料储层预测方法

朱广生 编著



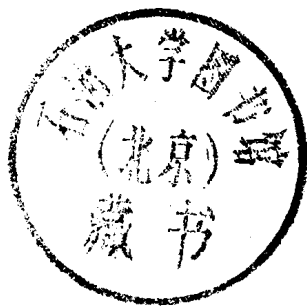
石油工业出版社

登录号	087460
分类号	P631.4
种次号	C58

地震资料储层预测方法

朱广生 编著

52962/15



石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书共分四章，第一章从地震勘探角度讲述了有关岩石物理性质，主要是速度规律和吸收特性，它是用地震资料作储层预测的基础。另外三章讨论了目前生产中实际应用的储层预测方法。其中第二章为岩性预测方法；第三章是储层物性参数预测，包括孔隙度预测、压力预测和吸收系数提取等；最后一章是油气识别方法，内容有DHI、AVO及人工神经网络油气预测方法。笔者力图使本书系统、简洁、易懂而实用。

本书可供高等院校石油物探、石油地质专业师生使用，也可供从事油气勘探和开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震资料储层预测方法 / 朱广生 编著

—北京：石油工业出版社，1995.2

ISBN 7-5021-1360-6

- I. 地…
- II. 朱…
- III. 地震勘探—方法
- IV. P631.4

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里2区1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

*

850×1168毫米 32开 $7\frac{3}{4}$ 印张 201千字 印1—1500

1995年2月北京第1版 1995年2月北京第1次印刷

定价：10.00元

前 言

自本世纪 20 年代初德国人 L.Mintrop 将世界第一个地震队投入工业应用后，地震方法作为油气勘探的主要工具，形成了一套日臻成熟的构造研究方法。然而在整整半个世纪里，地震勘探也只限于解决构造问题，它不能解决以储层岩性、孔、渗、饱等物性参数及孔隙流体性质为内容的储层预测问题，但这些内容却一直是地球物理学家孜孜以求的目标。近二十年来，随着地震数据采集方法和装备的改进、数据处理技术的提高和解释方法的发展，逐渐形成了一套用地震资料作储层预测的方法，并已应用于工业生产。在此期间，国内外有关专业刊物上出现了大量这方面的论文，内容涉及岩石物理性质、储层预测的各种具体方法及其应用效果等。可是迄今国内尚无一部专著系统地讨论地震储层预测方法。

本书是根据散见于国内外各种刊物上的文献，结合笔者教学和科研成果编写而成的。初稿为教材，已在校内使用了七年，曾经两次修改。这次又重新作了彻底的修改，笔者希望它能成为一本系统、简结、易懂而实用的参考书。

在近二十年的不断发展和应用中，地震储层预测方法所提供的资料日益丰富和可靠，这使地震方法不但在油气勘探而且在油气开发中成为不可缺少的工具。但应指出，这套方法远不如构造研究方法那样成熟。它对储层研究的最基本需要还不能完全满足，如对至关重要的孔、渗、饱三个物性参数，仅仅能对孔隙度作出预测，而不能根据地震资料得到渗透率和油气饱和度。不仅如此，限于当地震分辨率，现在作出的预测结果往往不是对应于单个岩层，而是对应于一组相邻岩层的，其精度不能令人满意。事实上本书讲述的各种方法仍在继续改进和发展中。地震储

层预测技术是现代地震勘探的产物，它由于油气田勘探开发的实际需要应运而生，也必然会在石油工业的推动下随地震方法的发展而逐渐完善。本书只不过是这门技术发展初期一些基本方法的粗浅汇编，如能起到一点抛砖引玉作用，笔者将甚感欣慰。

在这里我要衷心感谢我的老师牟永光教授、杜世通教授、陆基孟教授、信荃麟教授和刘泽容教授的鼓励和帮助，特别感谢陆基孟教授对最初油印本稿的指正。衷心感谢王松贵高级工程师、杨辉高级工程师、洪月英高级工程师、刘力辉工程师允许我使用他们的资料。对所引用的其他资料的作者表示敬意和深切的感谢。感谢在长达七年的初稿试用期间我的同事们给予的帮助和关心。

限于笔者水平，书中不当甚至谬误恐所难免，敬请读者批评指正。

朱广生

一九九四年八月于江陵

目 录

第一章 地震勘探中的岩石物理性质	(1)
第一节 地震波速度及影响因素	(1)
一、岩石矿物成分对速度的影响	(1)
二、岩石密度的影响	(3)
三、孔隙度的影响	(5)
四、埋深的影响	(6)
五、孔隙流体对波速的影响	(11)
六、温度影响	(20)
七、横波速度问题	(25)
八、石灰岩速度的特殊性	(30)
第二节 地震波的吸收衰减	(33)
一、介质的品质因数 Q	(33)
二、恒定 Q 值模型	(34)
三、衰减的影响因素	(37)
四、粘弹性介质中的反射波	(53)
五、关于衰减的机制	(56)
参考文献	(57)
第二章 岩性预测方法	(60)
第一节 砂泥岩含量预测	(60)
一、层速度计算及平滑	(61)
二、量板法计算砂岩含量	(62)
三、Mahajan 公式法	(67)
四、多参数法估算砂岩含量	(70)
五、资料解释举例	(70)
第二节 用地震资料识别岩性	(73)

一、综合用纵横波资料作岩性识别·····	(73)
二、用纵波资料作岩性预测—约束反演法·····	(87)
参考文献·····	(90)
第三章 储层参数预测 ·····	(92)
第一节 孔隙度预测 ·····	(92)
一、碎屑岩孔隙度预测方法·····	(92)
二、石灰岩孔隙度预测·····	(104)
第二节 用地震资料预测地层压力 ·····	(112)
一、基本知识·····	(113)
二、用地震资料预测地层压力的方法·····	(116)
第三节 吸收系数的提取及其应用 ·····	(128)
一、吸收系数的提取·····	(128)
二、吸收系数的应用·····	(133)
参考文献·····	(135)
第四章 用地震资料作烃的直接检测 ·····	(138)
第一节 地震剖面上烃的直接标志 ·····	(138)
一、影响反射波振幅的主要因素·····	(138)
二、地震剖面上烃的直接标志·····	(146)
三、假亮点及其鉴别·····	(156)
四、几点注意·····	(160)
第二节 地震振幅炮检距分析 (AVO) ·····	(165)
一、AVO 分析原理·····	(165)
二、AVO 资料处理要点·····	(173)
三、含气砂岩的 AVO 特征·····	(175)
四、AVO 用途的扩展·····	(191)
五、AVO 资料解释·····	(196)
六、AVO 的影响因素·····	(210)
第三节 神经网络油气预测方法 ·····	(224)
一、生物神经网络概述·····	(225)
二、人工神经网络简述·····	(225)

三、油气层横向预测方法·····	(231)
参考文献·····	(237)

第一章 地震勘探中的岩石物理性质

在地震勘探中，决定地震波特点的因素除激发、接收条件外，主要是岩石的弹性模量、密度和吸收特性。岩石的弹性模量和吸收特性又与岩石成分、孔隙度、孔隙内流体性质、密度、埋藏条件、地质年龄及岩层各向异性等密切相关。

本章主要讨论地震波速度、吸收特性及它们的影响因素等问题。

第一节 地震波速度及影响因素

岩层中地震波传播速度是地震勘探中最重要的一个参数，它不仅是地震时深转换必须的参数，也是储层物性预测中不可缺少的参数。它的影响因素多而复杂，并且同一个因素对纵波速度和横波速度的影响又不尽相同。

一、岩石矿物成分对速度的影响

经典弹性力学指出，在均匀各向同性完全弹性介质中，波速取决于介质的弹性模量，即

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (1.1)$$

$$\text{或} \quad V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1.2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1-3)$$

式中， ρ 为介质体积密度； λ 为拉梅常数； μ 为剪切模量； $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ ，称为体积模量。

岩石通常是由不同矿物成分组成的，不同的矿物具有不同的弹性模量，因此波速受岩石矿物成分的影响就是自然的了。

如果岩石无孔隙和节理，那么波速仅决定于岩石的矿物成分。Voigt 和 Reuss 分别给出了计算无孔隙岩石弹性模量的理论公式。Voigt 公式是：

$$\begin{cases} K_v = N_1 K_1 + N_2 K_2 + \cdots + N_n K_n \\ \mu_v = N_1 \mu_1 + N_2 \mu_2 + \cdots + N_n \mu_n \end{cases}$$

Reuss 公式是：

$$\begin{cases} \frac{1}{K_r} = \frac{N_1}{K_1} + \frac{N_2}{K_2} + \cdots + \frac{N_n}{K_n} \\ \frac{1}{\mu_r} = \frac{N_1}{\mu_1} + \frac{N_2}{\mu_2} + \cdots + \frac{N_n}{\mu_n} \end{cases}$$

式中， K_i 、 μ_i 为岩石中第 i 种组分矿物的体积模量和剪切模量， N_i 为该种组分所占的体积百分比， n 为矿物总数。

利用上述理论，根据岩石的矿物成分及其比例，查出各矿物成分的弹性模量，便可计算出该岩石的弹性模量来。Voigt 计算值为岩石弹性模量上界，而 Reuss 计算结果为下界。作速度计算时取二者平均值：

$$\bar{K} = \frac{1}{2}(K_v + K_r)$$

$$\bar{\mu} = \frac{1}{2}(\mu_v + \mu_r)$$

岩石密度由下式计算:

$$\rho = N_1\rho_1 + N_2\rho_2 + \cdots + N_n\rho_n$$

式中, ρ_i 为第 i 种组分矿物的密度。有了 \bar{K} 、 $\bar{\mu}$ 和 ρ 就可按 (1.2)、(1.3) 式计算出无孔隙岩石的纵横波速度, 只要将式中的 K 和 μ 分别取为 \bar{K} 和 $\bar{\mu}$ 就可以了。

二、岩石密度的影响

大量实际观测资料表明, 几乎所有各种岩石的波速都随密度增大而增大, 这种关系十分明显。图 1.1、图 1.2 为砂泥岩和石灰岩纵横波速度与密度的关系图。它是根据我国某油田 48 口井测井资料共 67000 个数据绘制的。我们看到波速随岩石密度增大而增大。

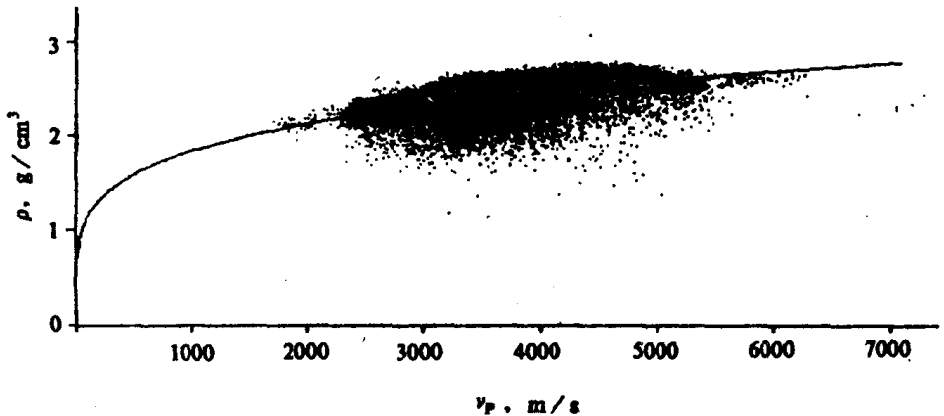


图 1.1 砂泥岩纵波速度密度关系 ($\rho = 0.414V_p^{0.214}$)

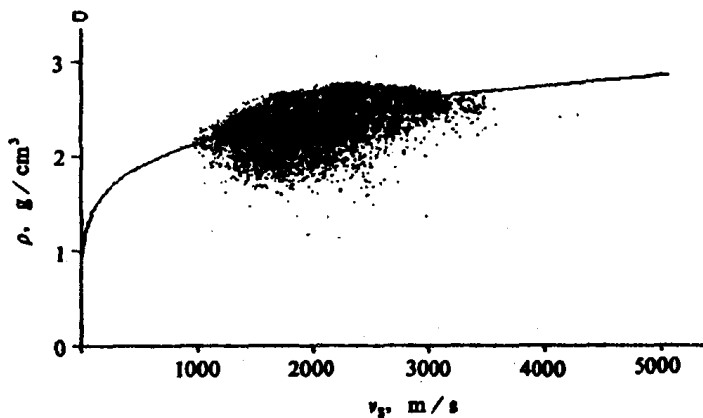


图 1.2 砂泥岩横波速度密度关系 ($\rho = 0.600V_s^{0.183}$)

早在 1974 年, G.H.F.Gardner 等根据大量的实验测量和野外观察资料, 统计得出沉积岩中纵波速度 V_p 与体积密度 ρ 的关系式 (1.4)。

$$\rho = 0.31V_p^{0.25} \quad (1.4)$$

式中, ρ 的单位 g/cm^3 ; V_p 的单位 m/s 。

根据我国某油田 48 口井全波测井资料统计分析, 得到下面经验公式和对应速度密度关系图 (图 1.1、图 1.2),

$$\rho = 0.414V_p^{0.214} \quad (1.5)$$

$$\rho = 0.600V_s^{0.183} \quad (1.6)$$

式中速度、密度单位同上。经国内外五套文献数据 (实验室岩芯测量值) 验算, (1.5) 式平均相对误差为 4.5%, (1.6) 式为 5.2%。大庆、江汉、南阳、新疆等油田实际测井资料检验, (1.5) 式平均误差为 4.5, (1.6) 式为 5.3%。这些结果表明, (1.5)、(1.6) 式有很高精度, 验算还证明, (1.5) 式的精度高于

Gardner 公式 (1.4)。(1.6) 式无前人公式可比较, 但其精度略低于 (1.5) 式, 这说明 (1.5) 式更适合我国各陆相沉积盆地使用。

上面所述速度密度关系似乎与前面给出的纵横波速度公式相矛盾, 其实不然。因为岩石密度增大的同时, 其弹性常数发生变化, 并且弹性常数变化率大于密度变化率, 从而导致波速随密度增大而增大。

三、孔隙度的影响

在其它因素相同时, 孔隙度大的岩石波速低。这是因为岩石孔隙度的变化会有效地改变岩石密度, 而且有效弹性模量同孔隙度随应力变化而变化的变化率相关。这种变化率有赖于孔隙形状。研究指出, 孔隙总体积对速度的影响是主要的, 孔隙大小和形态及矿物颗粒大小和形状对速度的影响要小得多。在相同应力条件下, 圆形孔隙形变比狭长孔隙形变小得多。当孔隙度相同时, 骨架颗粒细、孔隙小的岩石比颗粒粗、孔隙大的岩石的速度高约百分之几。考虑到这一点, 在理论研究时, 作为第一级近似, 可以假定固结岩石的固体物质成分和性质是均匀分布的, 其骨架则为宏观均匀的各性同性介质。

随着孔隙度的不同, 同一种岩石的速度值可以在很大范围内变化。另一方面, 固相成分不同的岩石也可能具有相同的波速。

Wyllie (1956) 提出了一个描述波速与孔隙度关系的实验公式, 即“时间平均方程”:

$$\frac{1}{v} = \frac{\varphi}{v_f} + \frac{1-\varphi}{v_m}$$

式中, v 为流体饱和岩石中波速; v_f 为孔隙所含流体的波速; v_m 为岩石骨架波速; φ 为孔隙度。

这个公式适用于处于较深地层的岩石, 特别是为盐水饱和的固结良好的岩石。在沉积盆地的最上层岩石是未固结的, 孔隙度

主要随颗粒大小分布和随泥质含量而变化，并且速度随深度迅速增大，通常一直增大到速度逼近于符合时间平方方程的速度。在此深度下，地层表现得象固结良好的岩石，速度主要取决于孔隙度， v 和 ϕ 二者满足于时间平均方程。尽管如此，大量现场观测和实验室测定数据证明，时间平均方程对大多数沉积岩是适用的，所以它在测井中得到广泛使用。

人们曾希望找到岩石中孔隙度和速度之间的简单关系式，后来发现，这种关系是不存在的。广泛使用的 Wyllie 公式也仅仅是个有条件使用的经验公式，超越使用限制是危险的。原因是岩石的有效弹性模量是同孔隙度随应力而变化的变化率有关，本身无直接关系。因此，速度与孔隙度的关系是复杂的。

四、埋深的影响

岩石成分不变，埋深增加时波速通常要增大。在实际介质中岩石成分往往随深度而变化。因此速度增长不是单调变化的，速度的垂直梯度往往完全被岩石成分和孔隙度的变化所引起的速度值变化复杂化。图 1.3 中曲线表示速度随深度和地质年龄变化的情况，这是根据北美大量岩石年代相同、砂泥岩中测井资料绘制的。由图可见速度随深度增大，随年龄而增大，速度的垂向梯度浅层大、深层小。苏联学者 (A.Г.阿维尔布赫, 1982) 的资料也指出，埋深不大时，速度增长最明显。在 2~3km 内，速度增长是非线性的，而且梯度显然逐步减小。再深，速度与埋深的关系几乎呈线性关系。

早在 1951 年，Faust.L.Y 就根据美国和加拿大的 500 多口井约 $3 \times 10^5 \text{m}$ ($1 \times 10^6 \text{ft}$) 的剖面实际测量结果，统计得出砂泥岩剖面中岩石的纵波速度与深度关系的经验公式，即：

$$v = a_m H^{1/6} \quad (1.7)$$

$$\text{或} \quad v = a(HT)^{1/6} \quad (1.8)$$

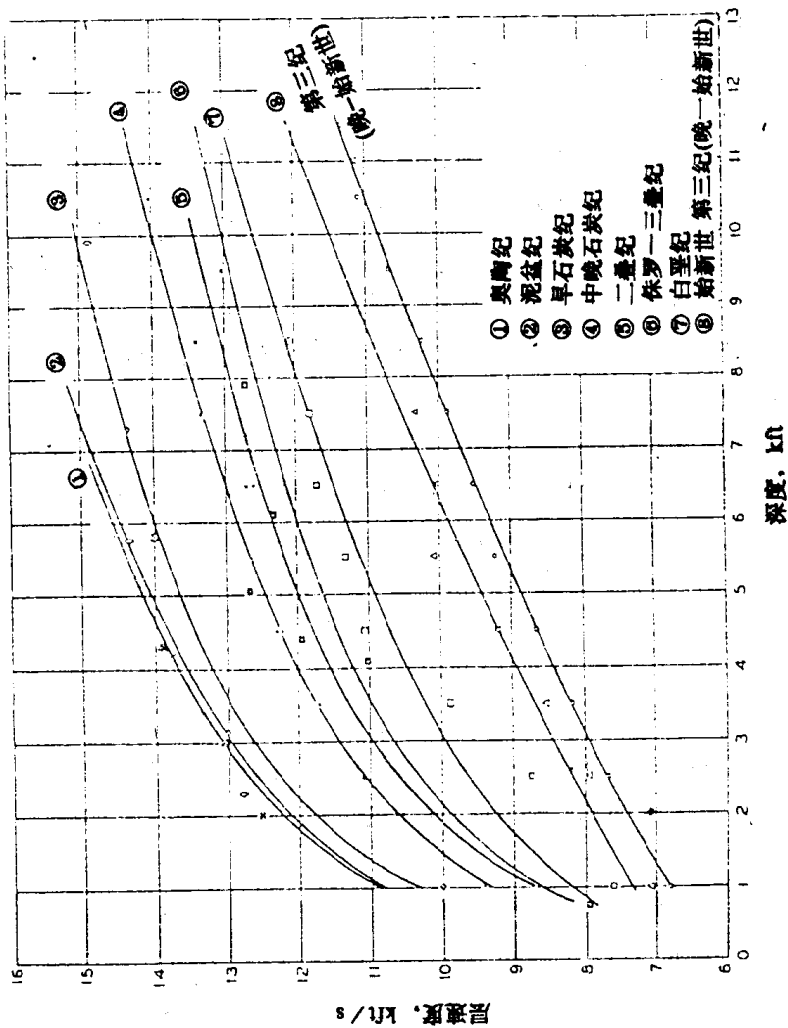


图 1.3 层速度随深度和地质年龄的变化

(据 L. Y. Faust, 1951)

式中, v 为纵波速度; H 为深度; T 为地质年龄; a 为常数。

当 v 的单位取 ft/s , H 单位取 ft , T 单位取年并按 Holmes 地质年代表计算地质年龄时, $a=125.3$ 。

这个公式被后人广泛引用, 常称为 Faust 公式, 直至今日该公式仍充满活力。

注意这个公式的使用条件是砂泥岩剖面, 深度不太大。式中 v 应理解为中心点深度为 H 的一段地层的层速度平均值。

速度随深度变化的主要原因是岩石后生作用上覆截荷的压力引起的压实作用和非弹性变形导致孔隙度下降, 最终使岩石整体弹性模量和体积密度的变化。在浅层数百米以内, 岩石胶结程度增高, 疏松岩石过渡为固结岩石也会对波速产生影响。

压力对致密岩石和多孔隙岩石中波速的影响是不同的。

1. 致密介质

对相同矿物成分的均匀致密介质, 影响波速的只有外压力。压力增大使晶格的原子靠拢, 从而使弹性模量增大。在地震勘探深度上的压力与原子间的力相比不算很大, 因而造成原子间距离的变化不太大, 对介质的弹性模量的影响实际上可以忽略。因此, 无孔隙岩石中波速取决于它的矿物成分。

例如岩盐是孔隙度很低的岩层, 从其内部结构来看, 与致密介质接近。在压力增加 22MPa 即相当于致密岩盐深度增加 1km 时, 仅使纵波速度上升 $10\sim 22\text{m}/\text{s}$ 的结果。因此可以认为实际地质剖面里岩盐中波速是不随深度而变化的 (A.Γ.阿维尔布赫, 1982)。

但是, 如致密岩石中存在微裂隙, 那么将会观测到波速随深度而增大的现象。G.H.F.Gardner 等 (1974) 曾指出, 这种现象是因为深度增大时压力增大, 使低压时所存在的微裂隙在高压时闭合, 从而使速度增大。

2. 孔隙介质

地下孔隙介质处于来自围岩的外压力及孔隙内流体的压力的作用之下。为了便于理解, 先就“压力”这一术语作一说明。

1) 关于地学中“压力”术语

首先我们指出“上覆压力”、“流体压力”一类术语中的“压力”，在地学文献中系指“单位面积上受到的压力”。从严格的物理学定义讲应当称为压强。但地学文献中一直用“压力”这一术语，人们也习惯于这种用法。因此“上覆压力”、“流体压力”等单位不是力的单位，而是压强的单位。在国际单位制中压强的基本单位是“帕斯卡”，简称“帕”（符号 Pa）， $1\text{Pa} = 1\text{N} / \text{m}^2$ 。欧美人习惯用“Psi”为单位， $1\text{Psi} = 1\text{bf} / \text{in}^2$ ；有人喜欢用“ kg / cm^2 ”作压强单位，也有人使用“巴”（符号 bar）为单位的， $1\text{bar} = 10^6\text{dyn} / \text{cm}^2$ ，或使用标准大气压（简称大气压）为单位。 $1\text{atm} = 10^6\text{dyn} / \text{cm}^2$ ，它相当于 76cmHg。国际单位与这些非标准单位间的换算关系是：

$$1\text{Pa} = 1.451 \times 10^{-4}\text{bf} / \text{in}^2$$

$$1\text{Pa} = 0.102 \times 10^{-4}\text{kg} / \text{cm}^2$$

$$1\text{Pa} = 10^{-5}\text{bar}$$

$$1\text{Pa} = 9.869 \times 10^{-6}\text{atm}$$

$$1\text{bf} / \text{in}^2 = 6.895 \times 10^3\text{Pa}$$

$$1\text{kg} / \text{cm}^2 = 9.807 \times 10^4\text{Pa}$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{atm} = 1.013 \times 10^5\text{Pa}$$

由于帕斯卡单位太小，所以工程学中常用单位为千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa)

$$1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}$$

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

上覆压力 (Overburden Pressure)：地层上方所有固体和流体物质所引起的垂直压力。又译为“积土压力”、“负载压力”、“静