

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

横波勘探论文集

S·诺曼·多门尼科 主编

石油工业出版社

4-53

01

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

横波勘探论文集

S.诺曼·多门尼科 主编

邝少荣 方云飞 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书共收集了十六篇有关横波勘探的论文,比较集中地反映了国外对这一方法研究的现状。主要内容有:横波勘探的野外工作方法、震源、静校正和波的对比、复杂地质环境下纵横波的测定,以及横波资料在验证亮点、评价直接烃类指示、计算孔隙度和确定岩性等方面的应用。

这套丛书共有十四册,可做为一般地球物理勘探及地质人员的培训教材,也可供有关院校师生参考。

本册最后一篇文章由范伟梓翻译。

S. Norman Domenico

Shear Wave Exploration Symposium

Society of Exploration Geophysicists

美国勘探地球物理学家协会进修丛书

横波勘探论文集

S. 诺曼·多门尼科 主编

邱少荣 方云飞 等译

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

北京丰盛印刷厂

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 11³/₄印张 2插页 279千字 印1—1,800

1987年9月北京第1版 1987年9月北京第1次印刷

书号: 15037·2779 定价: 2.35元

目 录

一、为什么要用横波?	(1)
二、什么是横波及怎样使用横波?	(12)
三、马索——一种横波脉冲震源	(28)
四、路易斯安那州南部地面及井下的纵波、横波试验	(41)
五、在得克萨斯西部三个具有高速地表岩层盆地中的反射横波	(53)
六、关于横波勘探野外方法的若干问题	(57)
七、在一个复杂的地质环境——加利福尼亚州间歇泉——碧清湖地热区..... 的纵横波测定	(65)
八、静校正和反射波对比——横波勘探的两个重要课题	(79)
九、佛罗里达州西部海上纵横波反射的分离	(89)
十、横波偏振：用三分量地下记录测定各向异性的一份答辩	(101)
十一、利用纵波和横波地震剖面对比来验证亮点	(119)
十二、通过纵波和横波地震资料对比评价直接烃类指示	(123)
十三、根据横波/纵波传播时间比率估算碳酸盐岩的孔隙度	(151)
十四、井下测定横波速度的试验	(154)
十五、根据声波测井曲线解释 V_P/V_S	(158)
十六、 τ - p 变换（倾斜迭加）在地震反射资料处理中的应用	(162)

一、为什么要用横波？

Steve H. Danbom

(大陆石油公司)

把大地看成一个层状的弹性介质来研究，从复杂程度来说，介乎经常用来描述地震观测（特别是海洋）的层状流体声学模型和吸收值常为未知的类似的粘弹性模型之间。在这种弹性模型中，会出现两种不同类型的体波——质点运动方向和波传播方向一致的纵波（压缩波），质点运动方向与波传播方向垂直的横波（剪切波）。在模型的每一分界面上，任何一种入射的体波在透射和反射时都会产生这两种波。一个纵波（P波）或横波（S波）入射到这样的分界面时，所产生的纵波和横波的振幅与波前入射角的关系可以用叫作佐伊普瑞兹（Zoeppritz）方程的代数表达式来推算。图 1-1 给出了两个模型的例子，从这个例子中可以看到，当弹性界面稍有变化时，同一入射纵波会产生差别相当大的反射纵波和横波。

用限制震源处地面运动的办法来加强某种偏振，并采用只对一个方向的质点运动敏感的检波器，就很可能产生和接收这些弹性信号的偏振波。图 1-2（引自 Garotta, 1983）说明这一概念，其中X、Y和Z分别代表径向（沿测线）、横向（垂直测线）和铅垂方向。由图 1-2 可以肯定，纯的（例如纵波P）和转换的（例如垂直偏振横波SV）弹性

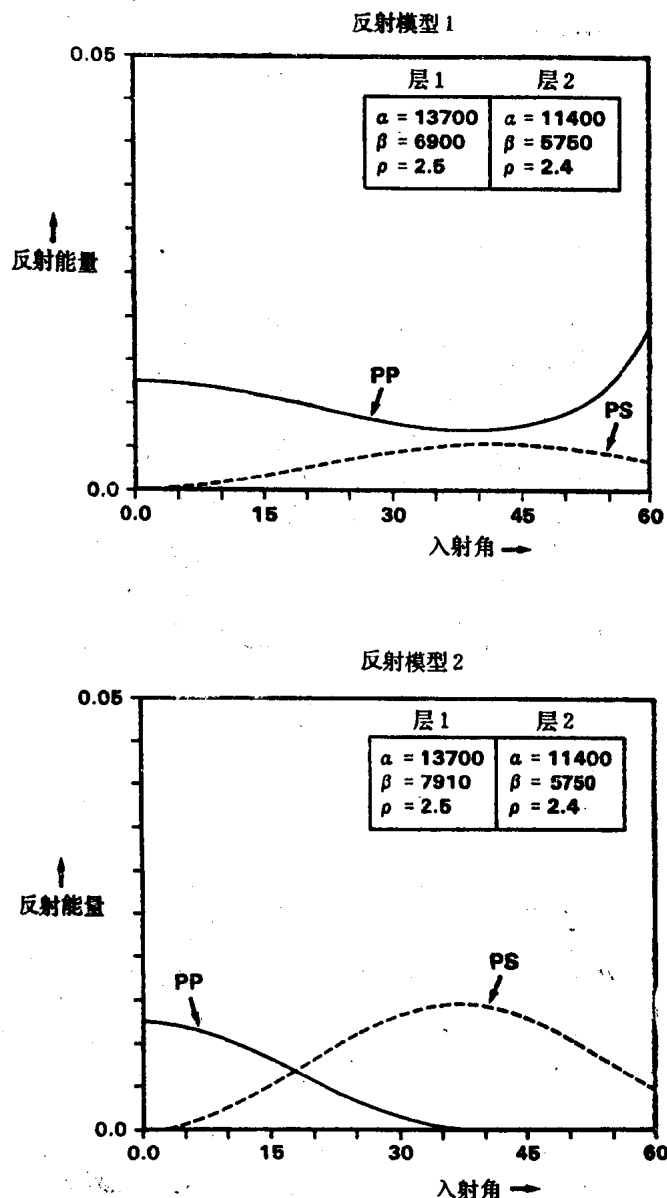


图 1-1

波都可以记录到。图1-3给出这些类型波的某些例子 (Garotta, 1983)。当试图记录一种波时, 很可能被另一种波造成“信号污染”, 图1-2中没有列举出这一点。例如, 对工业中占主导地位的地震方法, 即纵波 (Z) 震源和垂直 (Z) 接收器来说, 无容置疑的是, 在这种Z/Z记录上, 常常被当作多次反射波的某种规则噪音, 实际上可能是

接收器 \ 震源	X	Y	Z
X	SV		P/SV
Y		SH	
Y	SV/P		P

图 1-2

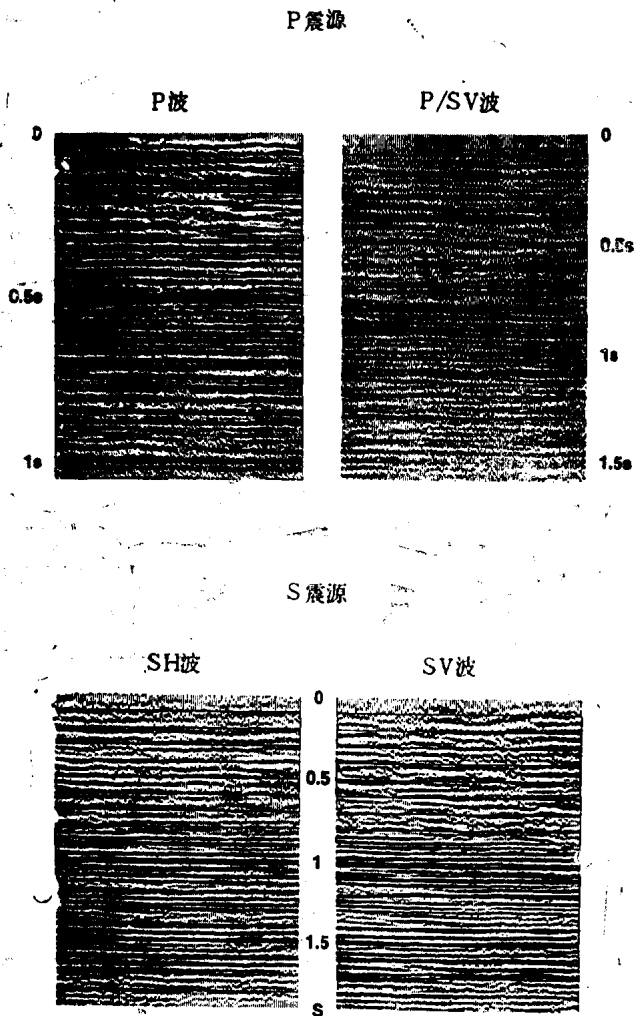
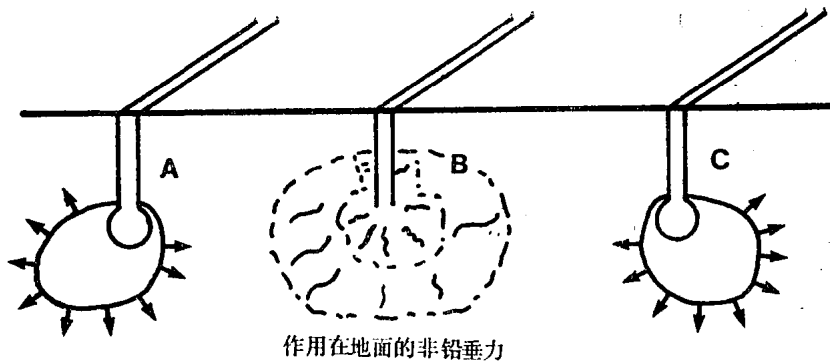


图 1-3

波型转换的横波 (P/S_v), 这种波也可以被垂直检波器所接收。由于近地表速度差异大而产生的曲射线效应有助于减弱这种波的接收。

当采用为转换波设计的记录参数时, 有可能记录到复杂的地震信号, 这导致工业上主要考虑用X/X (Garotta, 1983) 或SH/SH (SH指水平偏振横波) 横波记录。为此, 研制了几种震源。五十年代大陆石油公司 (CONOCO) 在研制纵波振动器的同时研制了一种横波振动器。后来, 法国地球物理总公司 (CGG) 研制了一种横锤震源和一种显然由俄国人使用过多年, 而被西方世界加以移植的技术, 地球物理总公司给这种技术起的商标名为SEISLAP。地球物理总公司用 SEISLAP 表明, 怎样用爆炸震源与横波检波器配合来接收水平偏振的横波信号。这一技术举例说明于图1-4中。更后些, 普拉克拉-塞斯摩斯公司 (Prakla-Seismos) 发展了一种产生横波的技术, 他们

把两个相位差180°的纵波振动器并排放着, 并与地震测线垂直, 这一技术的商标名为



从记录“A”减去记录“C”，以加强横波和相对地消去纵波

图 1-4

SHOVER。

记录纯型或转换型横波的共同问题是空变的表层低速带，它会引起大的时间延迟。从引自珈罗塔（Garotta）（1983）的图 1-5 中可以看出，横波的这种时间延迟或“静校

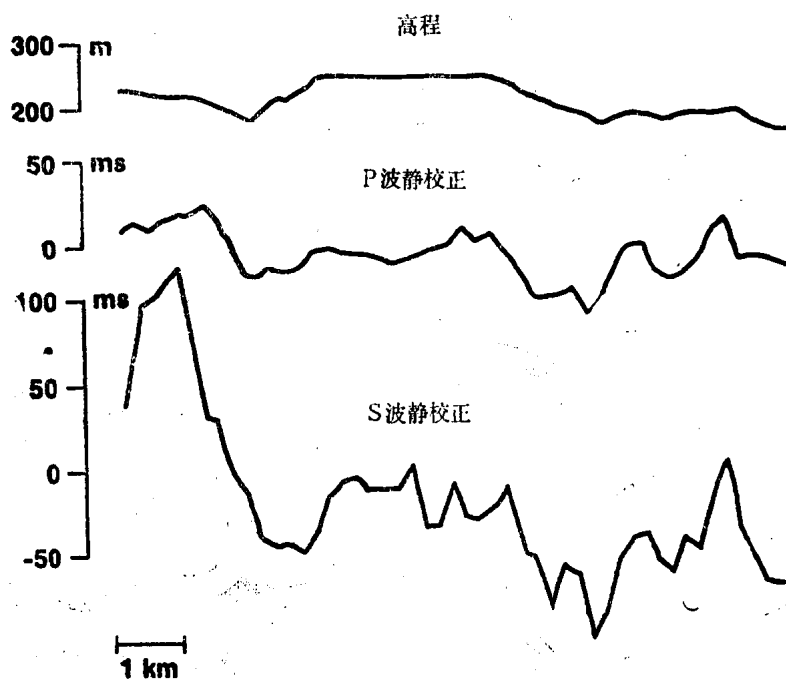


图 1-5

正量”要远远大于纵波的时间延迟，这是它们的形成机制所决定的。纵波信号的速度与传播介质的体积弹性模量和切变模量成比例，而横波信号的速度只与切变模量成比例。其关系式为：

$$V_P = \sqrt{(K + 4/3\mu)/\rho} , \quad V_S = \sqrt{\mu/\rho}$$

式中 μ = 切变模量;

K = 体积弹性模量;

ρ = 密度;

V_p = 纵波速度;

V_s = 横波速度。

在近代沉积地区,介质的切变模量(或刚性模量)非常低,因而横波速度也低。可是,一旦到达潜水面深度,由于含水层的体积弹性模量比含(空)气层大两个数量级,纵波传播速度大大加快了。与转换横波相比,横波/横波的“静校正”问题就更大了,因为在炮点和接收点都遇到这种低速带。

尽管横波/横波反射资料能够用处理纵波/纵波资料类似的方法来处理,但转换横波却有某些独特的问题。分析转换横波的射线路径(图1-6)可以明显地看出,从共炮点记录来抽取共中心点道集时,道集中各道的反射点很分散。因为纵波/横波反射点不是在震源和接收点的中点处,而是偏向接收点一方,其偏离中心点的距离取决于纵波和横波在反射分界面两边的速度。此外,P/SV反射波的正常时差方程式包括两部分(图1-7),传统的以反射为基础的速度分析方法对它是无效的。这些问题可以用不那么精确的近似算法(近期)解决,也可用迭前P/SV偏移方法(长远的)来解决,不过后者费用高昂些。

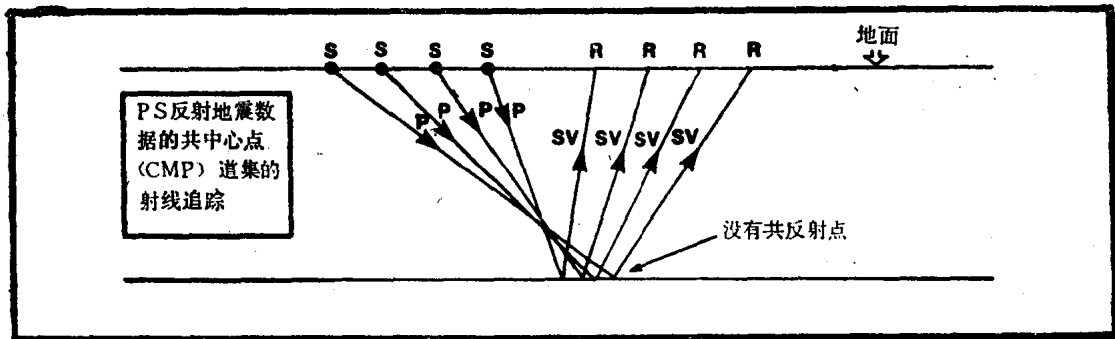


图 1-6

正常时差

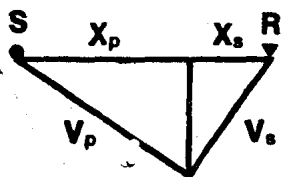


图 1-7

$$T = T_p + T_s$$

$$\Delta T = \left(-T + \sqrt{T_p^2 + \frac{X_p^2}{V_p^2}} + \sqrt{T_s^2 + \frac{X_s^2}{V_s^2}} \right)$$

转换横波的一些优点可以弥补处理其资料所增加的困难。首先,由于有了大量数据道的现代记录系统,这些转换横波可以和纵波/纵波数据(通常要与之对比)用同一震源同时接收。唯一额外的费用是作些关键性的专门处理。另一优点是,P/P和P/SV有相同的震源子波,所以比起用P/P和SH/SH资料来说更易于对比。珈罗塔(1983)举例说明了这一点,从图1-8本身也可以明显看出。第三个优点表现在非固结的沉积区。由于波(特别是横波)的吸收作用,往往很难保留地震信号的高频成分。如果横波只穿过这个介质一

次 (P/SV)，而不是两次 (S/S)，那么吸收损失将减半。此外，因为在接收点横波信号非常小，不会超过疏松介质较低的弹性限度；而对于S/S波，由于横波震源位移量大，常常引起介质“断裂”，造成非弹性能量释放，而不是人们所期望的弹性能量转换。

横波资料的两种用途已经变得明显了。其一，横波传播不受岩石孔隙中充填的流体的影响，所以从含有异常孔隙流体的岩石中穿过或反射时，所测定的横波特性（即横波响应）与纵波响应不同。其二，通过测定一段岩层的速度比 V_P/V_S 可以从下式得出泊松比 (σ) ：

$$\sigma = \frac{[(V_P/V_S)^2 \cdot 0.5] - 1}{(V_P/V_S)^2 - 1}$$

从而可以着手描述该段岩层的一些物理特性。的确，可以根据一些经验公式，例如加德纳 (Gardner) 方程 (Gardner 等, 1974)，用变量 V_P 推算密度 ρ ，或根据路德维格 (Ludwig) 等建立的关系式用变量 σ 推算密度 ρ 。有了 V_P 、 V_S 、 ρ 、 σ 四个变量，就可以计算其余的弹性常数，即杨氏模量 E 、 K 和 μ 。从各种意义上都可以说，纵波和横波的联合应用构成一个相互补充的综合系统。

几位作者给出了 V_P/V_S 或 σ 与一些重要的岩土工程参数之间的关系。如刚才提到的路德维格等 (1970) 给出过 V_P/V_S 或 σ 与 ρ 之间的直接关系。这种关系的基础示于图 1-9。如果根据这幅相互关系图可以从数学上推算出表达这种关系的多项式的常数，那就可以用这个关系从

V_P/V_S 或 σ 反算出 ρ 来。当然，任何经验关系式都应该在原作者建立时规定的条件下使用，到处套用经验公式可能导致错误。后来，格雷戈里 (Gregory, 1976) 曾给出孔隙填充物与纵横波速度比 V_P/V_S 的关系 (图 1-10)，这是他对疏松沉积岩样品进行实验室测定的结果。皮克特 (Pickett, 1963, 图 1-11) 和多曼尼科 (Domenico, 1983) 展示了用

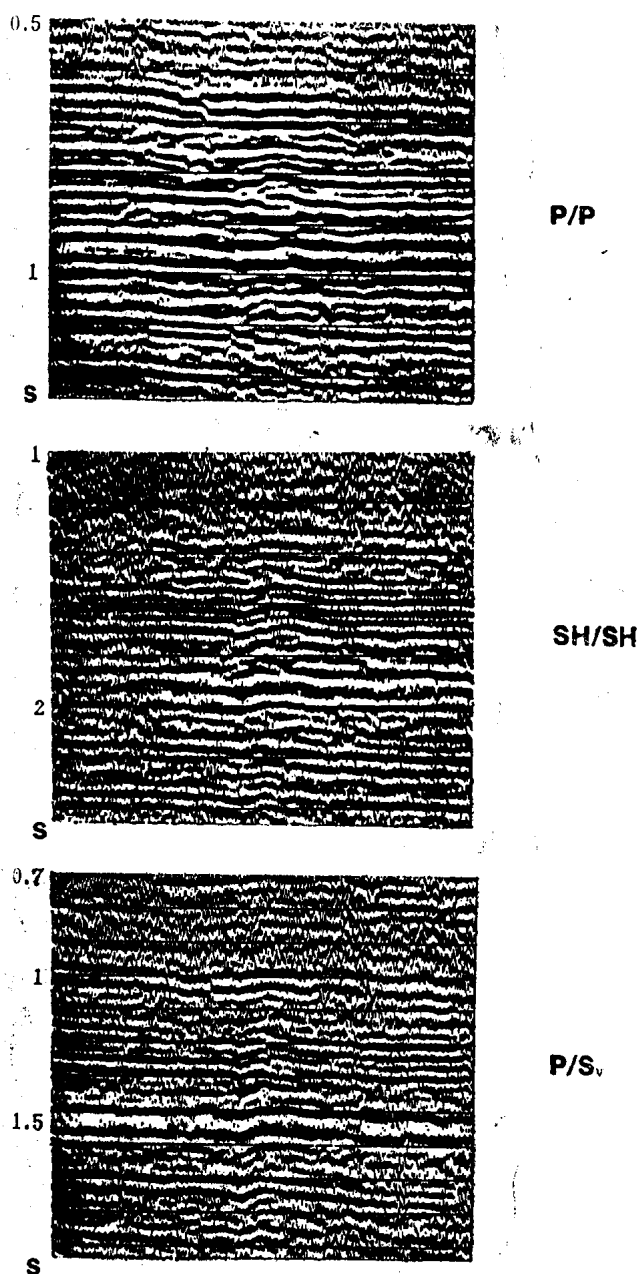


图 1-8

速度和 V_p/V_s 与 ρ 的关系曲线

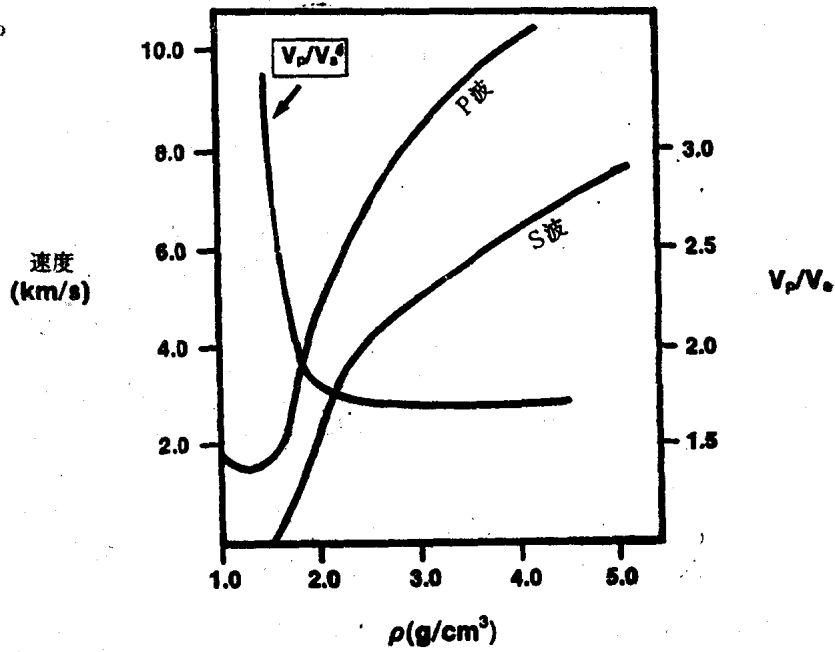


图 1-9

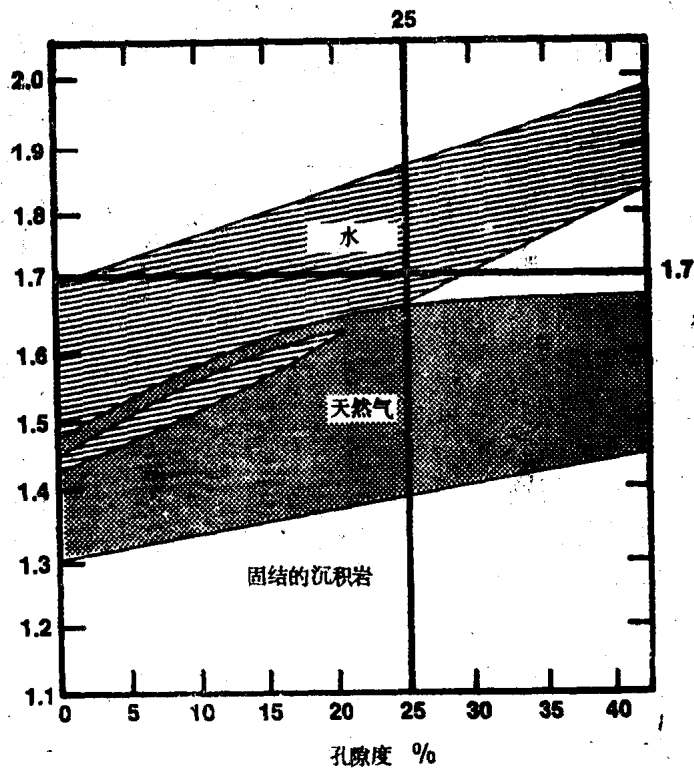


图 1-10

V_p/V_s 比来区分岩性，这几乎完全是由于石英的横波速度比碳酸钙高的结果。要想得到最好的使用效果，测定时各种类型岩石的孔隙度和孔隙填充物情况应相同。

直接对比两种体波的资料，意味着在对应的纵波和横波剖面上可以识别出同一地质体

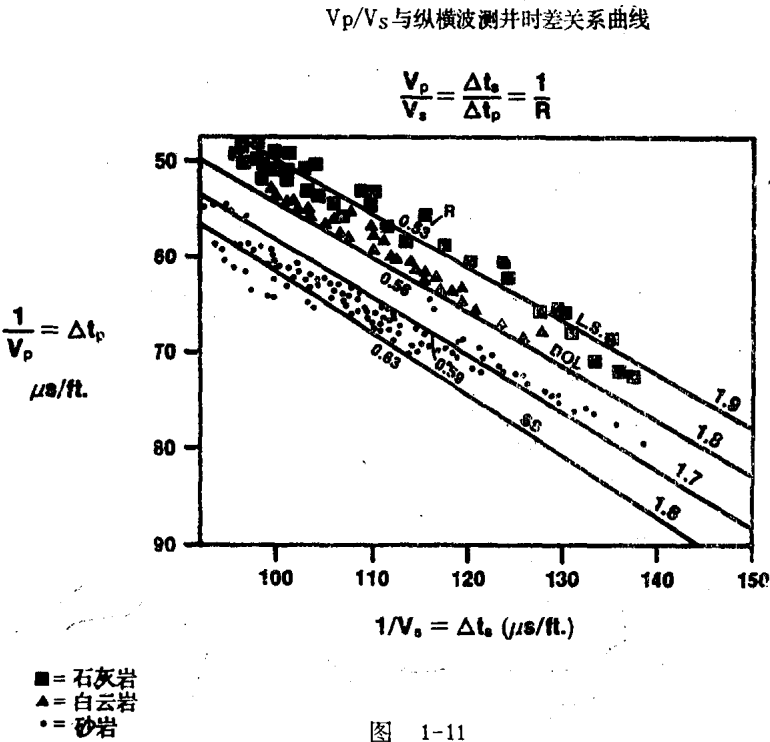


图 1-11

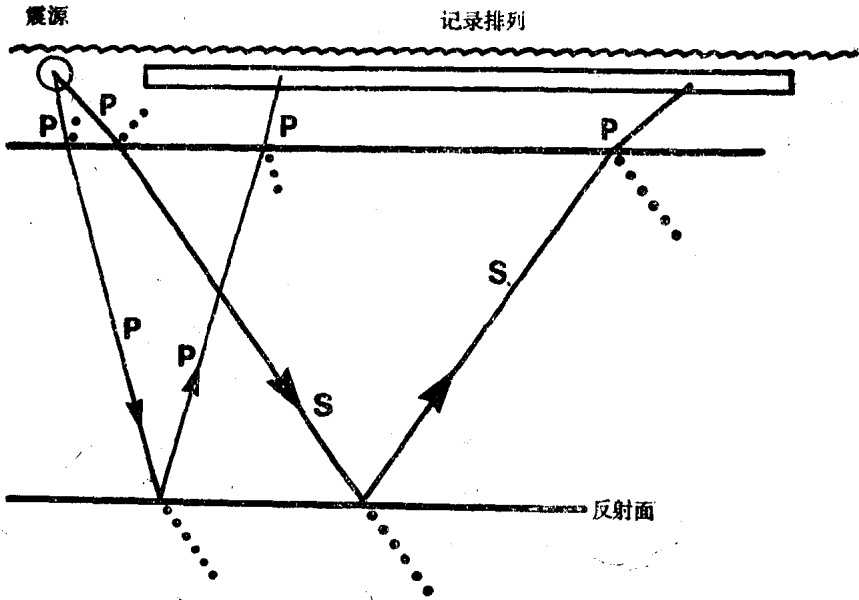


图 1-12

横波小组勘探项目的地点

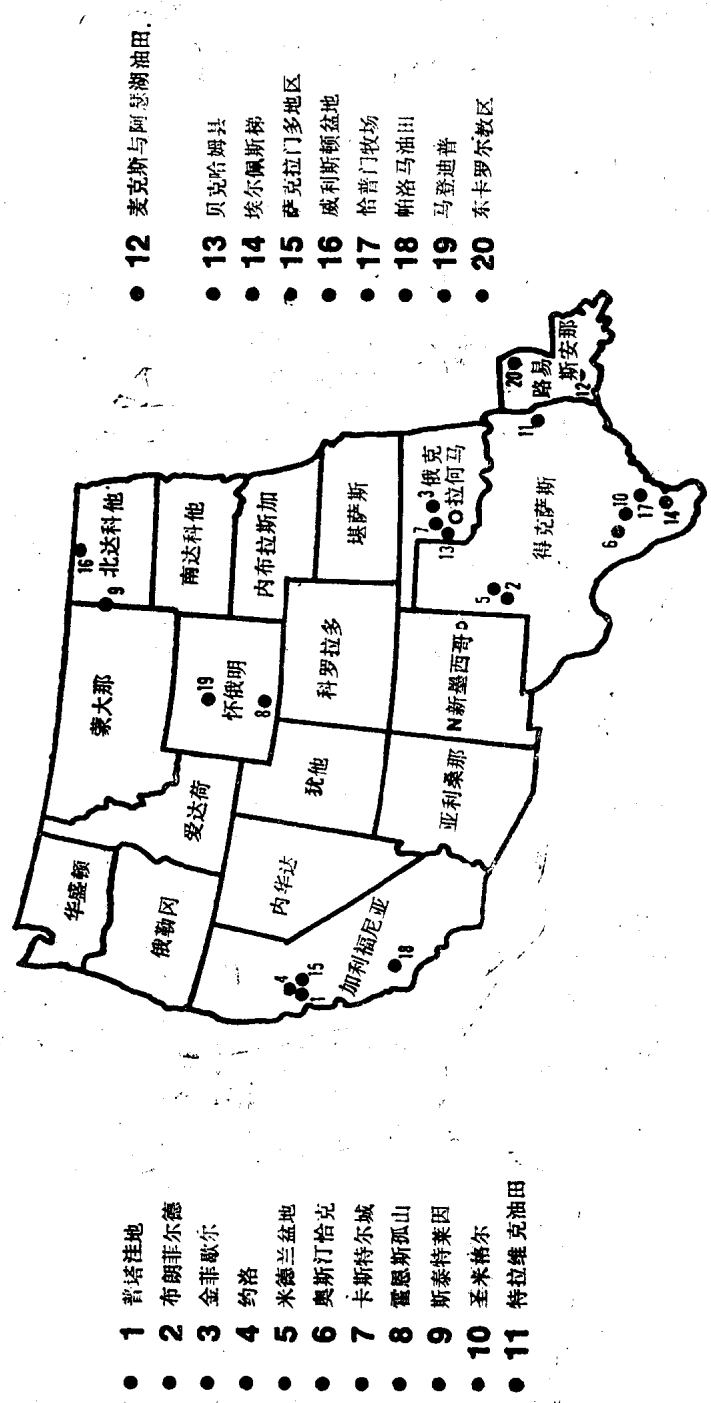


图 1-13

的反映。要是这些反映完全一致（除旅行时间外），也就是说，整个地质剖面的（纵、横波）速度比不变，那么识别和尔后对比这些反映就毫无问题了，但要是这样，也就根本没有速度比的异常，而这些异常可能是有远景地质区的指示。所以对比问题本身是一个自相矛盾的论题：要看出共同的地质特征需要有足够的相似性，但是，如果完全相似，那也就没有必要补充横波信息了。

确切地说，根据横波信息可以判别出振幅异常是否为烃类显示。如果纵波剖面上的一个异常也在横波剖面上出现，那么，这个异常多半是由于岩石基质变化引起的。但是，如果这一异常在横波剖面上不出现，那就明显证明这一异常是由于孔隙中流体变化引起的。这是因为充填到孔隙中的不同流体不会对岩石的横波速度有多大影响。

横波勘探不必局限在陆上。有几位作者（泰瑟姆（Tatham）、斯托法（Stoffa, 1976）和泰瑟姆与古斯比（Goolsbee, 1983））已经证明，当炮检距较大，纵波作用（入射）于“硬”海底时，在海洋环境下也可使横波透射进地层里去。这只是前面提到的佐伊普瑞兹方程的一个特殊情况，其特殊之处在于上覆介质的切变模量为零，因而没有横波传播。引自泰瑟姆和斯托法（1976）的图1-12中很好地描述了转换横波 PSSP 反射波。虽然这是转换横波，但它的处理不像P/SV波那样复杂。这是因为水速稳定，PSSP波射线中纵波的两段完全可以估计出来，所以这一段路径的影响可以像地形校正那样从反射记录道中去掉。经过这种校正之后的数据，可当作S/S资料按惯例处理。

海上横波资料还有一个吸引人的特点，目前已有用（例如）2英里（3.2公里）长的接收电缆采集的P/P波数据却同时记录了PSSP数据。但是至今研究证明PSSP的能量弱（Tatham和Goolsbee, 1983）。

有几个公司一直在从事把纵波/横波资料的综合利用引入石油勘探事业中的工作。这项工作从单纯研究和试制场所移到施工现场的时间，看来与大陆石油公司资助的一个小组的工作是一致的，这个小组从1976年开始采集纵波和横波资料。经过这个小组的努力，一个地震队用纵波和横波记录设备在20个地点进行了工作。图1-13和1-14示出每一地点的位置和工作目标。

从那个时候起，采集和处理都已有很大改进。图1-15是这种改进的一个例子，它给出路易斯安那南部地区过去和现在的资料对比。由于在资料质量上有了这些重大改

进，随之而来出现了一些只有资料质量高时才有意义的一些新的解释方法。图1-16是一个这样的例子（Garotta, 1983），它在P/P剖面上用颜色显示出 V_r/V_s 、 (γ_r) 和 σ 的连续变化图。当管理部门认识到这些显示的价值时，这些改进将影响今后纵波和横波的采集方式。

关于未来的发展，只需看看近期完成的勘探地球物理学家学会的德尔菲^①（Delphi,）

横波小组勘探项目20个地点的地质目标	
孔隙度研究	8个地点
尖灭	2
断层	4
石灰质滩	1
相变	11
普通地层学	6
构造	4
礁块	3
“亮点”	3
盐丘	1
过压区	2
火成岩床	1

图 1-14

① 德尔菲是古希腊的一座都城，附近有阿波罗神庙，有神秘预言之意。“德尔菲调查”转义为预测，一译注。

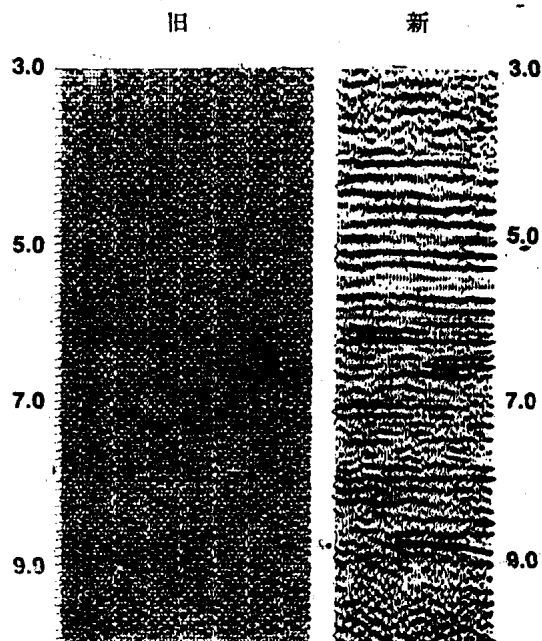


图 1-15

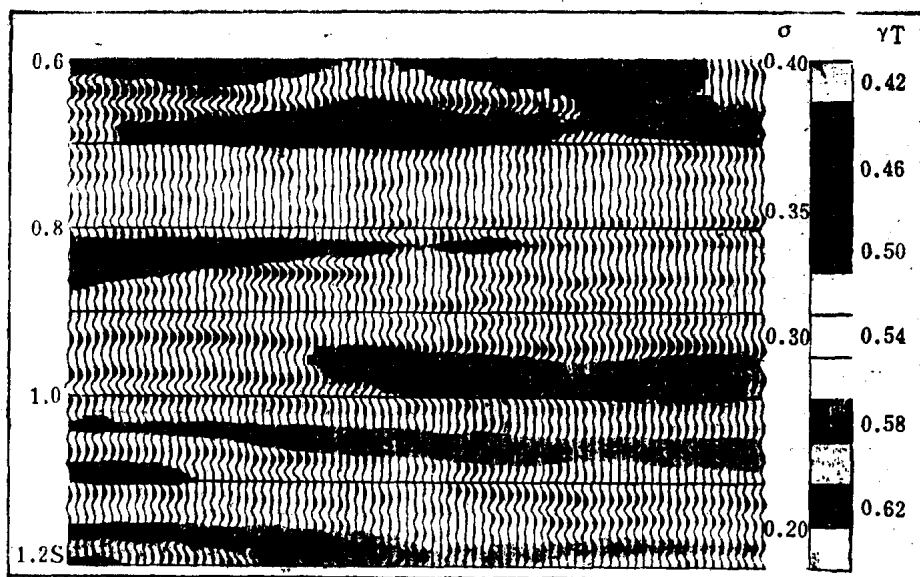


图 1-16

调查报告。图 1-17和 1-18给出调查报告的封面和某些结果。图 1-18中的第 1 项和第2项合并起来指出,为了接收转换横波等目的而使用多分量地震检测的趋势,这种趋势将使用越来越大的(多道)采集系统。同样地,第 3 和第4项合起来形成围绕着纯横波和转换型横波的解释概念。如果可以用地震方法提取有关孔隙填充物和部分饱和度的信息,并用全弹性波动方程推算模拟,那么,地震勘探工业将进入一个崭新的领域——在“现场”测定岩石的岩石物性学领域。

勘探地球物理学家协会
德尔菲调查
勘探地球物理学的技术发展预测
1983年 6 月出版

图 1-17

事 件	事件发生的可能性	事件出现的大体时间
具有1000道以上的地震记录系统占25%	100%	1990
25%的陆上地震勘探采用多分量检波器	95%	1991
用地震方法在现场测定孔隙中流体和饱和度	100%	1995
全“弹性”波动方程式取代“声学”方程式作为地震处理基础的占25%	85%	1990

图 1-18

二、什么是横波及怎样使用横波？

Klaus Helbig

(荷兰)

在地震勘探工作中，从数学出发一般用声波波动方程来描述地震波的传播。大多数野外地球物理学家发现，波动方程及其求解计算是很难行得通的，我们从字面上也不能接受声波波动方程是一种描述地震波传播的简化的说法，至少，当我们需要认识横波时是这样。这种说法会引起某种担心。我希望读者能允许我用弹性波动方程，而不是较简单的声波波动方程来作某些定性的讨论。

1. 横波的性质

当弹性波通过介质内部任意点上的一个小立方体时，这个小立方体发生形变（又称应变）和位移（参看图2-1）。变形和移位都需要能量。要产生形变必须有克服立方体内介质弹性的作用力（理论上由虎克定律阐明）。立方体来回运动的加速度需要有一个作用在立方体上的有效力，这个有效力等于加速度和这个立方体质量的乘积（牛顿基本方程）。同时应用于同一介质的上述两个方程和由它们联合组成的方程称为波动方程。如果我们只讨论单方向传播的平面波，从波动方程直接产生的结论是：“包含在”一个小体积内的两种能量——动能和弹性形变能量——在任何时候和在介质的任何地方都相等。

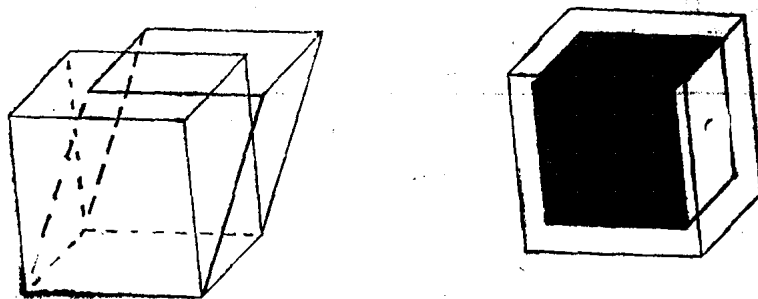


图2-1

一个改变物体形状而不改变其大小的应变称为切应变（左图）。一个改变物体大小而不改变其形状的应变称为压缩应变（右图）。产生应变所需要的应力（或压力）正比于应变的大小，其比例因子称为模量。模量大，所对应的变形抗力也大。

严格地说，声波方程只能描述流体中纵波（压缩波）的传播。幸运的是，在勘探地震学中遇到的大多数地震波传播问题都可以将地下界面看成是一个流体。这使得问题简化了，因为流体唯一需要力的静态形变是体积的变化（“静态”是说与时间无关，因为虎克定律描述的是平衡状态）。把问题限于流体介质，等于用简化的、只表示压力与体积关系的虎克定律（即只有一个介质参数——“不可压缩性”）来代替完整的虎克定律（有两个参数）。为什么把介质看作流体——对改变形状没有任何阻力——的假设不适用于描述横波（剪切波）呢？因为剪切应变是改变物体形状的应变（图2-1），而对形状改变没有阻

力就意味着没有横波。因此，如果要讨论横波，我们不得不讨论介质的完全弹性。不过我们可以用类推法来获得关于横波的许多认识，所以，最终我们不必去解全波动方程。

固体形变比流体形变要复杂得多。描述固体抗形变的阻力有一连串令人昏乱的弹性参数。大量增加弹性参数是为了方便。比方，一个结构工程师在设计一个起重机时，他所涉及的那些形变和应力在弹性波传播中并不出现，所以，他使用一些与地震学家不同的参数。幸运的是，任何弹性参数都能根据两个参数推算出来，所以人们可以充分利用弹性系统的这点灵活性，甚至可以创设一些特别适用于所研究具体问题的弹性参数。对地震勘探的实际应用来说，最方便的一对参数应该是：一个与横波形变有关的参数和一个与纵波形变有关的参数。让我们先说明两个通常使用的参数，然后才对这两种波的类型作进一步的讨论。介质具有两种基本形变，一种是改变体积，但不改变形状的形变；另一种是改变形状，但不改变体积的形变。第一种形变称压缩形变，它所对应的介质参数为压缩弹性模量 K ，而第二种形变称为剪切形变，它所对应的介质参数为切变模量 μ （也称拉梅第一常数）。

数学的严密性总是要求我们根据虎克定律的一般形式（带两个弹性参数）推导出波动方程，然后再看产生什么结果。我们可以这样做，但要靠某些复杂而高深的数学。所以，还是让我们走一条捷径：首先断定在平面波中哪些类型的应变能够独立地传播，然后找出哪个模量、（更正确地说，我们所选定的两个模量的什么样的组合）决定这种形变。最后，我们采用从声波方程讨论所得到的两个关系式，计算出有关的速度和阻抗：

(1) 速度的平方等于模量和密度之比；

(2) 阻抗的平方等于模量和密度的乘积，即：

$$V^2 = M/\rho \quad (2-1)$$

$$Z^2 = M \cdot \rho$$

式中 V = 速度； Z = 阻抗； M = 模量； ρ = 介质的密度。

怎样才知道在这些关系式中我们所用的物理量是正确的呢？回答很简单：弹性能量 E_e 和动能 E_k 这些物理量分别是表达式中应变的平方和质点速度平方的比例因子的两倍：

$$E_e = \frac{1}{2} M \cdot \epsilon^2 \quad (2-2)$$

$$E_k = \frac{1}{2} \rho \dot{u}^2$$

其中： $\epsilon = \frac{\partial u}{\partial Z}$ 和 $\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}$ 。

至于平面波是指在等相位平面上的各点均具有相同位移（或应力、应变或其它变量）的波。这里说的等相位平面可以是极大值平面，也可以是过零点的平面等。这就是说，在这样一个等相位平面上，位移向量必须是互相平行的，而且大小相等。任一位移向量在“局部”坐标系中可以分解成几个分量。这个坐标系中的一个轴——“传播方向轴”——垂直于等相位平面（即“波前”面）。将一个向量分解成平行于任意几个坐标轴的分向量，只是为了运算方便，并无物理意义。但是，在这个特殊的局部坐标系中，平行于波前面和垂直于波前面的两种位移，它们在均匀介质中传播速度是不同的。从这个意义上说，这两种位移量是主要的位移，这两个主要的位移方向对应两种不同的波型。

根据位移和波传播的方向关系，这两种波分别称为“纵”波和“横”波，为了确定这两种波的传播速度，我们只需找出其形变类型和相应的弹性模量就够了。