

横波和转换波法 地震勘探

Н.Н.普济廖夫 等著

石油工业出版社



登录号	087478
分类号	P631.4
种次号	057

横波和转换波法地震勘探

H.H.普济廖夫 等著

裘慰庭 李乐天 译

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书是世界地球物理文献中第一本论述横波和转换波方法的专著。目前,横波和转换波法与纵波方法相结合已达到生产应用水平。本书论述了此法的物理原理、野外观测方法和资料处理,给出了各种已成熟的地震勘探方法范围内(反射波法、对比折射法、垂直地震剖面法)横波和转换波的波场特征。本书十分重视综合应用纵波、横波和转换波进行勘探时所得到的新的信息特征,包括那些适用于直接反映油气的信息。

本书对地震勘探工作者、科研单位和院校的有关人员具有参考价值。

横波和转换波法地震勘探

H.H.普济廖夫 等著

裘慰庭 李乐天 译

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

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

*

787×1092 毫米 32 开本 10³/₄ 印张 237 千字 印 1—1,000

1993 年 3 月北京第 1 版 1993 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN7-5021-0765-7/TE·721

定价: 7.25 元

(国内发行)

3314/24

前 言

本书是世界地球物理文献中第一本关于以记录各种类型的横波和转换波为基础的地震勘探新方法的综合性专著。作者的目的在于研究新方法的各个主要观点，既包括理论基础，也涉及其试验依据问题。

本书的重点之一是研究地层中剪切振动的激发问题。根据所记录的波的类型——反射横波、反射转换波、不同结构的折射波等，分类进行基本方法的研究。对其中每一类波的野外试验方法都作了描述，分析了波场特征，阐明了所得资料的处理和解释方法，并且列出了成果资料的特点。同时，每次都强调指出所得信息与纵波相对应信息之间的相似性和不同点。

本书许多章节中都强调了研究横波和转换波的偏振效果以及速度各向异性的重要作用。运用波场的偏振特征可以使我們更全面地研究介质的各向异性。

不同物理性质的波（如纵波、偏振面位置不同的横波、PS 和 SP 转换波）的区别不是传播途径不同，而是波动特征不同。将这些波加以综合利用，可以使我們用新的观点去考虑各种方法的综合问题。这种方法作者称为多波地震勘探。对于勘探目标来说，这种方法能够在过去已经成熟的所有方法范围内（反射波法、对比折射法、井中地震学、地声学等）实现综合勘探。应用多波地震勘探的新的可能领域首先是找油找气。通过泊松比的负异常可以清楚地确定出油气

藏的位置。同时还探讨了综合应用不同性质的波解决金属矿勘探和工程地质问题的新的可能性。

本书的原理部分，特别是方法部分和解释部分是苏联科学院西伯利亚分院地质和地球物理研究所、苏联地质部全苏地球物理研究院、石油工业部西伯利亚地球物理勘探大队多年的研究成果，书中也应用了其它一些单位的材料。作者向参加过一系列研究的所有人员表示衷心的感谢，特别是下列几位，他们用多年的卓有成效的劳动来专门研究横波问题。他们是：Т.М.巴哈列夫斯卡娅，Р.И.尤金娜，В.А.库里科夫，А.Т.基诺德曼，В.В.罗克齐克，Л.В.米罗诺娃，О.Н.库兹涅佐夫，Б.Ф.阿达莫维奇，С.С.鲍尔希，В.И.叶甫斯季费耶夫，Т.Н.列别杰娃。

特别还要强调的是，在方法发展的初期阶段，И.С.别尔宗，А.П.沃林，Н.И.别尔坚尼科娃都作出了巨大贡献。В.В.费登斯基和 М.К.波尔什科夫对研究工作给予了不断的支持。

目 录

绪论	(1)
第一章 横波震源的理论模型	(10)
第一节 均匀无限介质中波的研究	(10)
第二节 作用在均匀半空间自由界面上的震源	(23)
第三节 均匀半空间内的半深埋震源	(33)
第四节 非均匀介质中波的激发特点	(38)
第二章 横波和转换波在层状介质中的传播特点	(47)
第一节 平面波在分界面上的反射和折射	(47)
第二节 半空间均匀层中的横波和转换波	(58)
第三节 横波和转换波在水平层状介质中的传播	(69)
第四节 横波和转换波在各向异性介质中 的传播特点	(81)
第三章 横波在地质介质中的传播速度和吸收	(95)
第一节 岩石中横波传播速度的研究方法	(95)
第二节 关于岩石中横波传播速度和 v_s / v_p 比值 的试验资料	(99)
第三节 弹性波在充满流体的介质中的传播速度	(114)
第四节 关于横波的吸收	(122)
第四章 横波激发方法	(128)
第一节 实用横波震源的共同特点	(128)
第二节 不同类型震源的主要指标和应用条件	(136)
第三节 影响横波激发效果的因素	(148)
第五章 反射横波法	(157)
第一节 野外观测方法	(157)
第二节 反射横波记录的波场特征	(164)

第三节	剖面上部的研究方法	(178)
第四节	试验资料的处理	(183)
第五节	所得成果资料的解释特点和共同特征	(196)
第六章	反射转换波法	(210)
第一节	反射转换波的运动学	(210)
第二节	各种类型反射转换波的记录特征	(222)
第三节	资料的处理和解释方法	(228)
第七章	折射横波和折射转换波法	(243)
第一节	折射波运动学	(243)
第二节	观测方法和波场特征	(253)
第三节	各种类型波的资料解释问题	(263)
第八章	井中研究	(274)
第一节	地震三分量测井的方法和技术	(274)
第二节	横波和转换波井中观测结果的解释	(277)
第三节	利用各种类型波研究井旁空间的地质情况	(294)
第四节	利用横波进行井中声波研究	(297)
第九章	综合应用纵波、横波和转换波解决地质问题 (多波地震勘探)	(301)
第一节	多波地震勘探的一般性问题	(301)
第二节	多波地震勘探在沉积岩研究中的应用	(307)
第三节	横波和转换波在勘探浅层矿藏时的应用	(323)
结束语		(331)
参考文献		(336)

绪 论

课题研究的进展

固体中可以产生两种弹性体波，即纵波（P）和横波（S），这一点早在 19 世纪初就得到了理论上的证实，然而，直到该世纪末，人们才在天然地震记录上发现这些现象。在天然地震学中，有效利用横波的例子就是人们发现了地核外表的液态层，其依据是在震中距为 103° （约 11000km）以上的地震记录上缺失横波。

从本世纪 30 年代初期开始，飞速发展的地震勘探技术主要以浅井或水池作为激发源，这时，弹性位移总场的主要分量是压缩波（纵波）。采用纵向可控震源和脉冲非爆炸震源对这方面的影响很小。毫无疑问，地震勘探以纵波为主是正确的，因为它能够借助于相对简单的波的激发并且仅仅使用纵向地震检波器记录就可以解决广泛的地质问题，特别是构造类型的问题，研究深度从几米（地声学）到几十、几百公里。

近二十年来，技术装备应用的更加完善，电子计算机处理信号的广泛应用，向高频和其它方向的发展，都加强了“纵波”地震勘探的阵地。但同时，它们也在很大程度上促进了地震勘探其它新方法的发展，包括以使用横波为基础的方法。

为了解决日益复杂的地质问题而必须引入横波和转换波的必要性在地震技术发展的早期阶段就已经认识到了。关于

这一点，Г.А.甘布尔采夫在自己的著作^{〔9〕}中明确地论述了使用非纵波的愿望，例如：他从总体上提出了建立综合法的任务，其基础是借助三分量记录区分具有纵、横波或混合特性的折射波和反射波。1938~1940年，在Г.А.甘布尔采夫的领导下，曾对横波的激发和记录进行了少量试验研究。更早些时候（1929~1932年），苏联科学院地震学研究所的研究人员在采用地面非定向震源激发的情况下获得了非常重要的成果。

第二次世界大战以后，50年代初人们就对非纵波表现了极大兴趣。在苏联，这种兴趣是与地震波理论的深入研究相联系的。这种研究首先是由列宁格勒的科学家们开展的^{〔5〕}。他们总结并发展了前人的理论研究成果，在此基础上，又系统地研究了包括横波震源在内的基本震源类型的方向特性，列出了单型波和转换波的反射—透射系数，奠定了计算理论地震记录的射线法基础。同时，列宁格勒的科学家们还进行了野外试验，研究了不同类型的小功率震源（首先研究的是定向力型震源）的波场特征，测定了上部地层的速度和波的吸收系数。

以这些理论及试验工作为基础，可以利用横波对较深的地质剖面进行系统研究。1958年全苏地球物理方法研究院开始进行这项工作，随后不久（1959年），苏联科学院西伯利亚分院地质和地球物理研究所也开展了此项工作。从那时起，这两个科研机构密切合作，在一系列生产单位，首先是苏联石油工业部西伯利亚地球物理勘探大队的配合下，对各个方面都进行了大量的方法试验研究。

因此，到70年代初，就创建了激发剪切波的各种方法，首当其冲的是爆炸型方法。研究了不同类型地层介质中

能量传输的最佳条件，开发并成功地试验了激发横波的振动方法。采用双向激发并按震源的方向特性来选择波，这种方法对于普遍推广横波具有重要意义。因此早在 1974 年就获得了反射界面埋深为 5~6km 的可对比的典型资料。

人们对转换波，无论是折射的，还是反射的都非常重视，对 PS 型的波尤为重视^[6]，为此还研究并大量推广了特殊的非对称抽道叠加的共深度点方法（OFT-PS）。

在地质结构不相同的一些地区分别进行了大规模的试验研究，以查明横波速度 v 的传播规律以及深度达 3~4 公里不同岩性成分的剖面中横波与纵波的速度比 v_s / v_p ，测定波的的各向异性和吸收参数。同时，人们还非常重视地面观测和井中观测方法来研究沉积岩，还为此而专门研究了直达横波的声波测井技术。

用理论计算配合野外资料的分析能够说明更多的问题。在很多情况下，只有用具有各种空间轴向的各向异性介质模型才能使三分量观测结果与计算资料相吻合（虽然并非总是这样）。因此，应该强调，引入横波可使我们更全面地解释岩石速度的各向异性现象，并且将这些现象与横波和转换波的空间偏振联系起来。

为了查明所记录波场的性质，开展了超声模型的实验室研究。为此又制造了特殊结构的发射探头和检波器，采用了用数字化仪器记录波动过程，用计算机处理资料的方法。

研究成果和新的技术装备使苏联能够在 60 年代末至 70 年代初在一系列地区展开大规模的横波和转换波方法试验工作。大部分工作是用反射波法来解决沉积岩中找油找气的问题。同时，还完成了折射横波和折射转换波法的试验研究，包括找金属矿的试验以及不同的井中观测。在试验和方法推

广阶段明确了这样一点：即综合利用不同类型的波（多波地震勘探）能够获得有关勘探目标的新信息。其中，反射波的多波方法能够相当准确地算出各层的泊松比值并找出泊松比与地层含油气性之间相当明显的关系。在联合采用不同类型的波绘制冲积层以下的结晶基底构造图时，尤其在同时利用记录上包括偏振变化在内的运动学和动力学特征时，我们能够相当准确地查明小断块，包括小幅度垂向位移。

与上述主要研究机构一起，苏联科学院地球物理研究所也成功地研究了横波和转换波这个课题，近几年，苏联科学院乌克兰科学中心的地球物理研究所也对此进行了研究。在苏联的这些研究工作的影响下，国外在这方面的研究工作，特别是从 70 年代中期开始也快速地发展起来了。

到目前为止，有关横波技术已积累了大量的各种各样的资料。这显示了综合运用不同类型波在解决一系列重要地质问题方面的新的可能性。本书是研究多波地震勘探问题的第一本完整著作。书中的原始资料是作者和其他同事的研究成果。这些同事有苏联科学院西伯利亚分院地质和地球物理研究所的，有苏联地质部全苏地球物理研究院的，也有苏联石油部西伯利亚地球物理勘探大队的。材料也来源于上述机构的野外队和项目研究组。同时，也采用了其它研究单位已发表的资料，特别是本书的前三章。

下面对弹性波理论的基础知识作些简要的介绍，这对于理解书中的专门章节是必需的。

弹性波理论的基础知识

众所周知，符合虎克定律的均匀各向同性弹性介质具有两种弹性模量^(34, 35)。这两种模量，或者是杨氏模量和泊

松比 (E, σ), 或者是拉梅常数 (λ, μ), 它们的关系由下列各式确定:

$$\left. \begin{aligned} E &= \mu(3\lambda + 2\mu) / (\lambda + \mu); \quad \sigma = \lambda / 2(\lambda + \mu) \\ \lambda &= \sigma E / (1 + \sigma)(1 - 2\sigma); \quad \mu = E / 2(1 + \sigma) \end{aligned} \right\} \quad (\text{I})$$

参数 μ 是位移模量。

除了上述参数外, 有时还使用各向压缩模量

$$K = E / 3(1 - 2\sigma) = \lambda + 2\mu / 3 \quad (\text{II})$$

以上所列数值都是正的。

在极限情况下, 即固体转化为液体时, E 和 μ 都等于零, 而泊松比 $\sigma \rightarrow 0.5$ 。此时, 常数 λ 具有各向压缩模量的意义。

对于大部分岩石来说

$$E = 3 \cdot 10^9 \div 10^{12} \text{H} / \text{M}^2; \quad \sigma = 0.1 \div 0.48$$

$$\lambda = 4 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{11} \text{H} / \text{M}^2$$

$$\mu = 10^9 \div 5 \cdot 10^{11} \text{H} / \text{M}^2$$

$$K = 5 \cdot 10^9 \div 5 \cdot 10^{11} \text{H} / \text{M}^2$$

由弹性理论可知, 如果一个物体只受到施加于其表面的外力作用, 而没有内力 (质量力), 则均匀介质的弹性运动可用下列方程组描述:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 \omega &= \rho \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III})$$

式中 ρ ——介质密度；

u, v, w ——沿坐标轴 x, y, z 的位移分量；

$\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ ——形变后物体单元的相对体积膨胀。

一般来说，形变后的固体介质单元会发生旋转，其各分量具有下列形式：

$$\begin{aligned}\omega_x &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right); \quad \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)\end{aligned}\quad (\text{IV})$$

如果用 x 对 (III) 式中的第一个方程求导，用 y 对第二个方程求导，用 z 对第三个方程求导，然后将这些结果相加，经变换后可得：

$$\nabla^2 \Theta = \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} \quad (\text{V})$$

该表达式是体积压缩（变薄）的波动方程。它表示压缩波（纵波）传播过程的特征，这种波的速度为：

$$\begin{aligned}v_p &= \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho} \\ &= \sqrt{(E / \rho)(1 - \sigma) / (1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}\end{aligned}\quad (\text{VI})$$

方程 (V) 对于每一个位移分量都是正确的。

如果现在用 y 对方程组 (III) 中的第三个方程求导, 用 z 对第二个方程求导, 将其相减, 并按式 (IV) 的格式进行类似的运算, 就得到没有体积膨胀的方程组:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2(w_x) &= \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 w_x}{\partial t^2} \\ \nabla^2(w_y) &= \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 w_y}{\partial t^2} \\ \nabla^2(w_z) &= \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 w_z}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII})$$

用向量形式表示为:

$$\nabla^2 \text{rot} \vec{u} = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 (\text{rot} \vec{u})}{\partial t^2} \quad (\text{VII}')$$

最后一个式子描述了波的传播过程。在此过程中同时发生了质点旋转。这种波称作横波, 其传播速度取决于剪切模量和介质密度

$$v_s = \sqrt{\mu / \rho} = \sqrt{E / 2\rho(1 + \sigma)} \quad (\text{VIII})$$

由于在横波中没有体积膨胀 ($\Theta = 0$), 所以由式 (III) 可知, 波动方程 (VII') 对于每一个位移分量都是正确的。

这样, 在理想的各向同性均匀弹性介质中, 可以互不关联地传播两种波——纵波和横波。对纵波来说, 介质质点的位移垂直于波前, 即沿着通过空间给定点的那条射线。而对

横波来说，则是沿着波前或者垂直于不同方向的射线发生位移。这句话的含义是：横波有别于纵波的一个重要性质是横波具有相对于射线的空间偏振。依偏振类型不同将横波分为两种：一种是在射线平面内发生偏振，用 SV 表示；另一种是在垂直于射线的平面内发生偏振，用 SH 表示。SV 波和 SH 波在简单介质中传播时，物体质点分别沿着垂直面和水平面运动。

S 波和 P 波传播速度之比只与泊松比有关：

$$v_s / v_p = \gamma = \sqrt{(1 - 2\sigma) / 2(1 - \sigma)} \quad (\text{IX})$$

由此

$$\sigma = (1 - 2\gamma^2) / 2(1 - \gamma^2) \quad (\text{IX}')$$

当 $\sigma \rightarrow 0$ 时，致密介质的极限最大值 γ 等于 $1/\sqrt{2} \approx 0.707$ 。当 $\sigma \rightarrow 1/2$ 时， γ 值趋近于零（转变为液态）。

在液体和气体介质中，质点旋转没有阻力，也就是说，剪切模量 $\mu = 0$ 。由此可得出结论，横波可能只存在于具有弹性的介质中，而纵波则可在任意粘滞系统中产生和传播。

波动理论的一个重要结果是波在界面上出现转换（反转）现象：在纵波倾斜地入射到界面时的反射和透射过程中同时也会产生横波，这种横波称作 PS 转换波。如果在横波倾斜地入射到界面时存在位移向量的法线分量，那么也会产生相反的现象——从下行横波中形成纵波 SP。

纵波和横波均属体波，因为它们的产生都同作用于介质的体力（质量力）有关。弹性体波既可在无限空间，又可在

有分界面的介质中存在。与纵横波同时出现的还有一组面波。这些面波出现在介质中有突变界面的地方，首先是地层与空气间的界面。具有重要意义的是瑞雷面波和勒夫面波。瑞雷面波在某种程度上类似于在液体表面产生的波。这时，介质中的质点运动具有“纵—横”的混合性质。勒夫面波完全属于 SH 型横波，产生这种面波的必要条件是：半空间上部某一层的速度 v_s 要小于下伏介质的速度。地震勘探中，面波常被认为是干扰波。

第一章 横波震源的理论模型

在实际非均匀介质条件下（最突出的是上部地层，通常在那里激发地震波），由于某种激发而产生的应力分布常常具有复杂的形态。这种情况同样会导致在介质中所激发的振动出现不同类型纵波、横波和转换波的干涉。所以，为了在类似情况下辨明波场结构，必须首先研究基本的相对简单的弹性波震源类型的理论模型，首先是研究局部均匀介质中的震源模型。关于震源理论^[4, 5]方面简要知识的介绍是以弹性线性理论机制所许可的程度为基础的。

第一节 均匀无限介质中波的研究

一、定向力型点震源

任何同相震源系统都可称为点震源，其条件是这种系统的几何尺寸小于波长。需要强调的是：点震源是数学上的抽象概念，它可能在某种程度上与现象的实际物理性质相符合。

关于定向力型点震源问题以及用弹性波理论解这个问题，都是针对这样一种模型提出的，在该模型中，方向已知的体力 F 作用于一定体积 V ，为使体力在 $V \rightarrow 0$ 时转变为点力，假设移向单位质量的合力无限增大。但这时，其乘积 $FV\rho$ 趋近于一个有限的极限值 F_0 ，其中 ρ 是介质密度。

研究震源方向特性函数时常采用球坐标系 (R, Θ, α) ，它与笛卡尔坐标系 (x, y, z) 是一致的。笛卡尔坐标