

复杂介质中 地震波的解释

〔苏〕 Б.Н. 卢增科 著

石油工业出版社



(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书研究了由断裂带界面形成的直达波, 以及由近垂直断裂界面和与其毗连的近水平界面所形成的双重反射波。讨论了复杂介质中双重反射波的形成前提、物理学依据及其解释方法等, 并用实例说明了在研究近垂直界面时利用双重反射波的可能性。

本书可供从事金属、石油、工程地质的地球物理工作人员、科研人员以及有关院校师生参考。

复杂介质中地震波的解释

(苏) Б.Н. 卢增科 著

周延坤 译 李国治 王维佳 校

*

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 $4\frac{5}{8}$ 印张 100 千字印 1—1,500

1992 年 1 月北京第 1 版 1992 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0692-8 / TE · 657

定价: 2.90 元

前 言

如果说，不久之前地震勘探依靠封闭式背斜构造还能基本保证所探明构造数量的有计划增长，那么近年来在可勘探的深度范围之内，这类构造的潜在量实际上已挖掘殆尽。要保证油气储量的必要增长，就必须过渡到对结构复杂的断块构造和构造—屏蔽式储集层的勘探。所以，必须深入研究断层和盐丘陡坡的各种勘探方法。

地震波携带有关近垂直界面的主要信息。重、磁以及其它地球物理勘探法的结果只是这类信息的补充。在地震记录上，近垂直界面不久之前还是根据间接的标志进行区分，例如，地震波对比中断、振幅异常衰减等，而较少利用绕射波和双重反射波（*дуплексные волны*）（又称两次波（*Волны двойной кратности*））。

本书研究了断裂带反射的直接解释问题，这种反射有来自断裂带界面的直达波，以及近垂直断裂界面和与其毗连的近水平界面所形成的双重反射波。毫无疑问，对断裂带产生的反射进行解释能从根本上提高对断裂带的认识，这样就可直接引用而不是间接引用地震资料来揭示断裂带。

书中讨论了复杂介质中地震双重反射波的形成前提、物理学依据、问题的概况及其解释方法的实质，非常重视分析该问题的数学模拟和物理模拟的结果；讨论了近垂直界面所形成的直达波和双重反射波的实际资料；研究了双重反射波形成的动力学和运动学特点及其解释方法。还提出了在研究近水平界面时所推荐采用的地震勘探工作方法。

书中用实例说明了在应用各种方法研究近垂直界面时利用双重反射波的可能性。研究了所有的实用深度范围：工程地震勘探深度为 5~400m；构造（石油普查）地震勘探深度可达 5~7km；深地震测深的深度可达 40~160km。所有研究都是以实际资料为依据的。在研究垂直界面时针对各种类型的复杂波场图进行了解释尝试。

作者涉及到的大多数问题，在以前发表的有关描述个别地区和区域研究结果的文章中，虽都已作过讨论，但总的说来，这个问题还是第一次研究。书中列出了作者提出的在东西伯利亚和西西伯利亚地区断裂带识别标准的分类。НПО 的石油地球物理所的区域地震剖面的实际研究资料是本书的认识基础。实际资料表明，在综合解释中应用双重反射波就能大大地提高研究断裂带的可靠性，以及提高用地球物理工作解决问题的有效性。书中还列出了分析解释近水平界面反射产生的直达波和双重反射波的各种基本运算法；指出了地震勘探新发展方向的基本状况。

本书推荐的方法实际上可应用于各种地震研究领域。毫无疑问，如同任何新生事物一样，本方法将日益完善和发展。在编写本书过程中，作者与 НВ НИИГГ 的全体工作人员，特别是与沙利莫夫（Шалимов）密切合作，部分研究成果是共同完成的。许多问题，例如双重反射波动力学的研究、三维解释问题、复杂介质工程探测及深地震测深（ГСЗ）时双重反射波的应用等都是作者原先的研究课题。书中涉及的部分问题带有探讨性质，现阶段地球物理学界应该讨论这些问题，这对于为作者所提出的研究近垂直界面的设想选择今后正确的发展方向，无疑是非常必要的。

目 录

第一章 复杂介质中地震波解释问题的现状	(1)
第一节 模型研究	(3)
第二节 断裂带地震和地质—地球物理资料的分析	(9)
第三节 与断裂带有关的波的类型及其形成条件	(16)
第四节 识别断裂带时所用的分类和评价准则	(23)
第二章 复杂介质中地震波解释方法	(29)
第一节 多层介质中双重反射波的运动学特征及其追踪条件的研究	(29)
第二节 双重反射波的动力学研究	(43)
第三节 在二维和三维地震观测时双重反射波解释特点的研究	(49)
第四节 利用双重反射波解释结果绘制近垂直界面的方法	(53)
第五节 考虑了中间折射界面时绘制近垂直界面的方法	(66)
第六节 共深度点反射波法野外地震勘探工作方法	(73)
第三章 在研究陡倾斜界面时用不同方法识别和解释双重反射波	(76)
第一节 在工程勘测时复杂介质的地震研究	(76)
第二节 构造（石油普查）地震勘探	(82)
第三节 深部地震研究时利用双重反射波的前景（以西西伯利亚和东西伯利亚为例）	(110)
第四节 利用计算机解释陡倾斜界面产生的地震反射波	(123)
结论	(138)
参考文献	(141)

第一章 复杂介质中地震波 解释问题的现状

按照当代的地质学认识水平，不久以前采用的水平层状大地构造模型是过分简单了。超深钻孔 Кольская—1 的资料、最新地球物理研究结果以及航天照片的判读都证实了这一点。主要的勘探地球物理法（地震勘探法）越深入发展，就越感到有必要对垂直分界面进行研究。在勘探对象复杂的情况下，为了研究陡倾斜界面的地震勘探方法，就不可避免地要扩大为解决这类问题所使用的有效波的范围。

随着反射波法的出现，提出了追踪构造断裂带的问题。这个问题在国内、外许多著作中都有论述。最大量的工作是在理论方面，而且其注意力主要集中在绕射波问题上。

构造断裂带是根据一定迹象综合识别的。原始资料是重、磁异常图以及各种地震资料（反射波法、折射波法、深地震测深等）。虽然地震资料是被间接应用的，但它们最可靠，因为断裂带可根据地震界面或基底面埋深急剧变化加以确定。在地震记录上，这些地段是可根据一系列标志划分出来的^[6]，如：地震波的对比中断、振幅的异常衰减等。在有利的地震地质条件下，如果有动力学特征明显的基准反射界面存在，那么划分断裂带问题主要就可单靠反射波的波场分析来解决。在这种情况下，绕射波可作为断裂的辅助标志，而断裂带产生的直接反射是很弱的，因为这种反射受到强反射波的干涉。

在实际中常会遇到这种情况：由于动力学标志不稳定的

反射波是在噪声背景下记录下来的，因而界面追踪条件会明显变坏。在这种情况下，根据反射波的记录特征以及与其相应的反射界面单元的位置就不可能判断有无断裂存在。绕射波被记录下来的事实本身以及绕射单元在剖面上的分布常常是作为说明有断裂带存在的主要信息。对于识别绕射波来说，并非总是拥有足够的判据。通常，研究者识别的是同相轴异常陡的波。按这个标志，将这类波归属于断裂带特有的强非均匀性所生成的波。最近，不论在国内文献〔12、14、22、32、34〕，还是国外文献〔34、41〕中，对解释时利用直接由断裂带倾斜界面所反射的波的可能性，都作了阐述。毫无疑问，分析解释断裂带的反射可以使我们从根本上提高对它们的认识以及获得更为可靠的地球物理资料的解释结果。

目前，能查明断裂带的反射波地震勘探野外技术和分析解释方法，尚不能满足要求。根据许多研究结果^{〔35~37〕}，盐层面产生的反射波可以看作是倾斜界面形成的、尚未查明的一种复杂的地震波。陡产状地段中盐层面主要的结构特点是非镜面性的（незеркальность）^{〔10、32〕}。特别是，该界面的特征是反射系数不稳定（指大小和正负号）。这种现象主要与盐层面本身的，以及盐层面与覆盖沉积物两者的弹性性质急剧变化有关。覆盖层与盐层面呈角度不整合接触。在大多数情况下，盐层上覆地层中的纵波速度是随深度而增大的。因此，盐层面的反射系数是由穹顶向槽部变小的。这本身就会引起盐层陡坡反射波强度的减弱。由于地震记录上有其它规则和不规则地震波（例如，反射波、多次波和其它类型波等）存在，所以识别盐丘斜坡产生的反射就变得非常困难。盐穹构造地震地质特点的差异决定了用于盐体形状研究

的地震勘探方法技术的多样性。其中共同的办法，就是优化激发条件，采用较佳的地震干涉接收系统，在处理资料时叠加地震记录等，来提高盐层面的弱反射（绕射）波的强度。但是，这些方法都要受到与盐丘斜坡陡度太大有关的限制。

在盐丘陡倾角（近于垂直）坡面的情况下，现有的大多数方法收效甚小，因为这类界面产生的反射波实际上不能在地面上被记录下来。上述情况决定了在反射波法地震勘探中有必要拟定适用于陡倾斜界面的专门研究方法。其中之一，就是通过追踪和解释某一类反射波来研究陡倾界面。

Б.П.沙利莫夫为了研究伏尔加河流域的断裂带和盐丘陡坡，全面分析了利用双重反射波的可能性^{〔34~36〕}。在他的著作中研究过两层剖面条件下双重反射波形成的运动学问题，并给出了在解释反射波法资料中应用该波的实例。由于实际地震地质条件远远不同于两层模型，所以，由于尚没有识别和追踪多层介质中传播的地震波的方法，因而实际解释变得十分困难。作者发展了Б.П.沙利莫夫著作中提出的概念。对多层介质中双重反射波的运动学特点进行的研究，可使我们阐明该波起点与终点的位移以及反射波和双重反射波时距曲线的相互关系。在搞清这些规律的基础上提出了绘制陡倾斜界面反射的方法，以及一套运算法和处理程序。本方法已用滨里海、东西伯利亚、西西伯利亚、莫斯科向斜所得的地震资料作了试验。

第一节 模型研究

在模型研究中，应重视绕射波问题，例如，由刚性固定棱边缘产生的绕射波。还应研究构造断裂带中折射—绕射和

反射—绕射波的形成问题。这些研究成果部分地可用来分析断裂带界面形成双重反射波的特点。应该指出，虽然上述问题的解很严格而且精度很高，但在实际中直接应用这些研究成果仍是很困难的。其原因在于绕射带的某些模型与实际情况相差甚远。因为，在实际情况中反射界面上每个断裂能产生的不是一个，而至少是上下两个绕射点（棱）。分布在绕射点附近的最近的界面也常参与绕射波的形成过程。

根据数学和物理模拟结果，反射绕射波有如下的动力学特征。绕射波在记录形态及不同相位的振幅关系方面都不同于反射波。断层下棱产生的绕射波，其形态畸变最大。由绕射波过渡到反射波，可见到频谱主频有急剧的变化。同反射波的频谱相比，绕射波具有更低的主频。靠近反射波和绕射波两者的切点，绕射波的振幅增大。绕射波和反射波频谱形态也是不同的。绕射波振幅的衰减特征取决于激发点相对于断块上升盘的位置（图 1）。

地震记录动力学特点对比结果示于图 1。对比结果很一致。数学模拟和物理模拟资料的某些量的差别，可能与所用模型的相似性不完善有关。绕射波和反射波的振幅曲线（图 1）与文献〔35〕所给出的物理模拟资料是非常一致的。骤然看来，关于在反射记录区内不可能形成绕射波这个结论与野外地震勘探工作的经验是相矛盾的。

在 Б.П.沙利莫夫的著作中介绍了反射波和绕射波两者的一般规律。它可归纳如下：这两种波的强度是随震源频率增加而减弱的，原因是频率增高时震源点附近参与形成绕射波和反射波的线性尺度变小了。但是，对于不同类型的波来说，线性尺度变小的程度也是不相同的，绕射波线性尺度缩小的程度要高于反射波。因此，当下行波的频率由 100Hz

降至 25Hz 时, 绕射波的相对强度能提高一倍以上。由此可见, 要在记录到绕射波的情况下划分出反射波, 就必须保证较高频率的激发条件, 相反, 要在反射背景上划分出绕射波, 就必须保证产生较低频率的频谱。

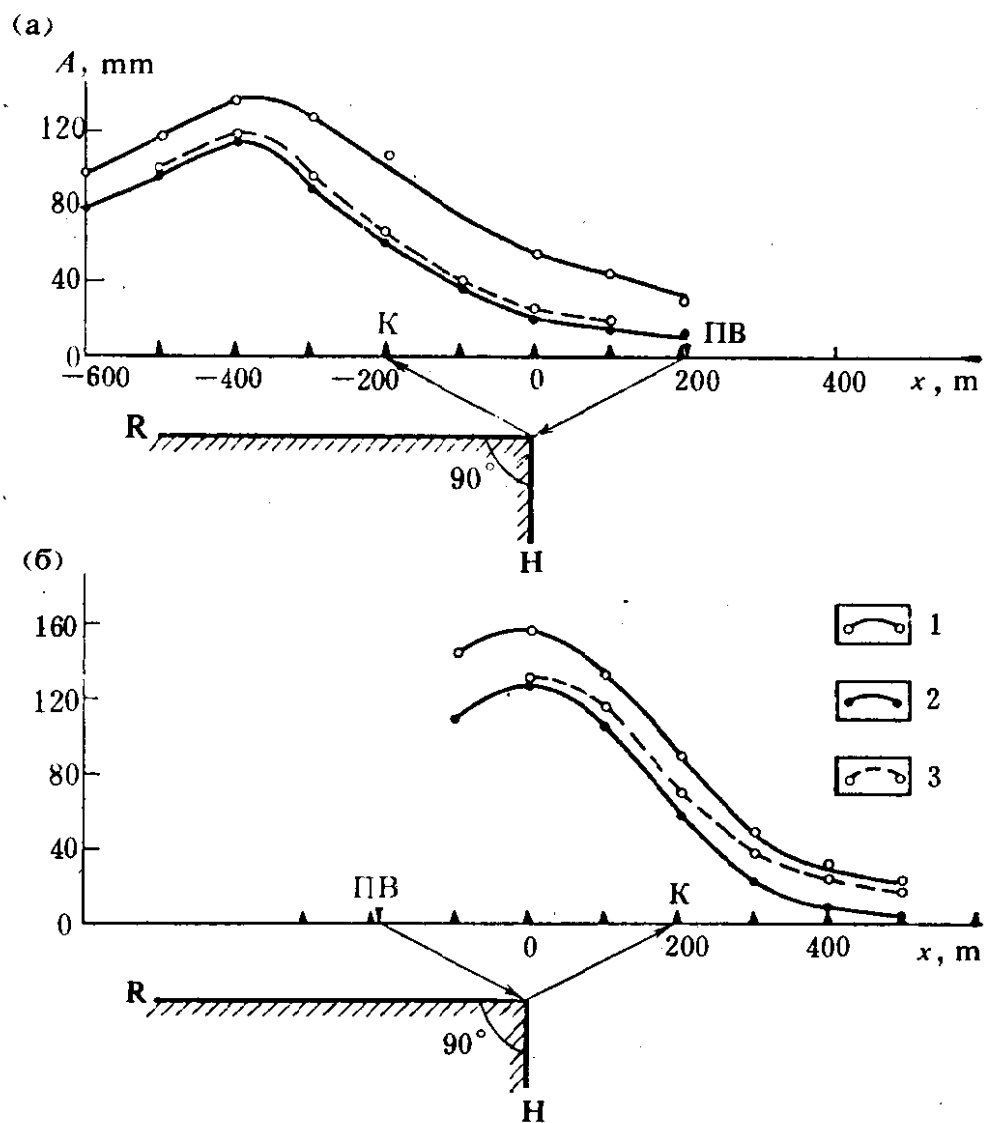


图1 数学模拟与物理模拟结果的对比 (据 Б.П.沙利莫夫)

(a) 激发点位于断层下降盘上方, $X_{\Pi B} = 200\text{m}$; (6) 激发点位于断层上升盘上方, $X_{\Pi B} = 200\text{m}$; 1—按数学模拟资料获得的反射波和绕射波的振幅曲线; 2—按“水—水泥”介质物理模拟资料取得的反射波和绕射波的振幅曲线;

3—“水—有机玻璃”介质的同类曲线; R , H —绕射棱面

文献〔32〕描述了双重反射波（由相继两次反射而形成的波）的数学模拟试验。文中用于模拟的是以解地震射线的欧拉—拉格朗日微分方程组为依据的射线法。双重反射波数学模拟程序可以用共炮点记录形式和以中心点射线方法得出的时间剖面形式，来计算二维介质模型的地震波运动学参数。图 2 就是用上述方法得到的双重反射波数学模拟实例。在共炮点模拟地震记录（图 2 (6)）上，与双重反射波相应的是具有异常低 v_k 值的同相轴。在按一次反射共深度点道集形成的地震记录（图 2 (b)）中，双重反射波 RoH 的时距曲线具有直线形态或接近于直线形态^{〔32〕}。模拟研究说明，要在复杂波场中识别具给定视速度的双重反射波，就必须采用直线定向求和法。

目前，国内尚没有在三维模型上的双重反射波模型试验。但是，我们在著作〔40〕的三维介质模型的波场中找到了双重反射波。该著作研究了被断层复杂化了的三维物理模型的复杂波场。

反射层可用分散的柱形束来模拟。为了突出主要界面产生的反射以及压制干扰波（侧面波和绕射波等），应用了共深度点偏移法。偏移技术在于用给定的加权系数对信号振幅值求和（图 3）。

从图 3 可看到具有许多干涉带的复杂波场形态。在用二维偏移法处理资料之后（图 3 II (6)），记录仍未摆脱干扰波的背景。只是在完成了三维偏移后才观测到与实际模型接近的图像（图 3 II (b) 及 III）。不同于二维偏移，在三维偏移后 B 波就消失了。这很可能就是侧面波，其传播方向在剖面 (6) 的观测平面之外。此外，请注意 FM 波（图 3 II (a)）。根据已有的模拟试验经验，这种波的形成，很难

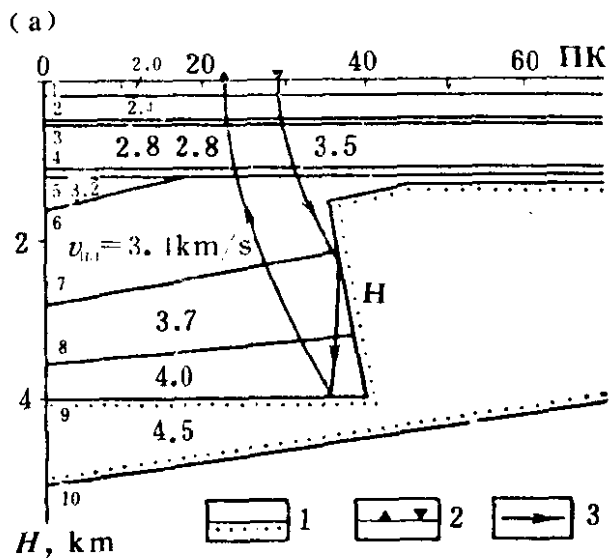
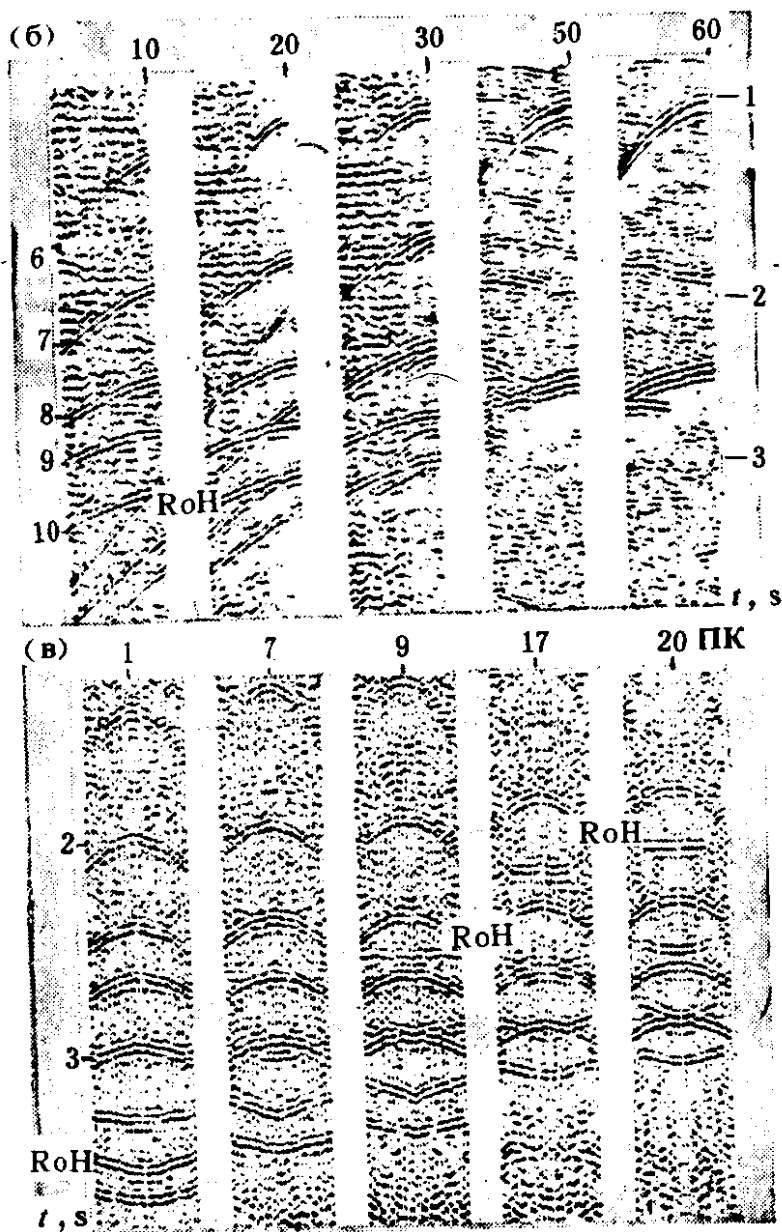


图 2

(a) 盐丘模型；(6) 与其相应的共炮点地震记录（在该地震记录上与双重反射波 RoH 相应的是低视速度同相轴）⁽²⁵⁾；(B) 共深度点地震记录；1—盐层界面；2—炮点和接收点分布图；3—双重反射射线示意图；1~10—层面



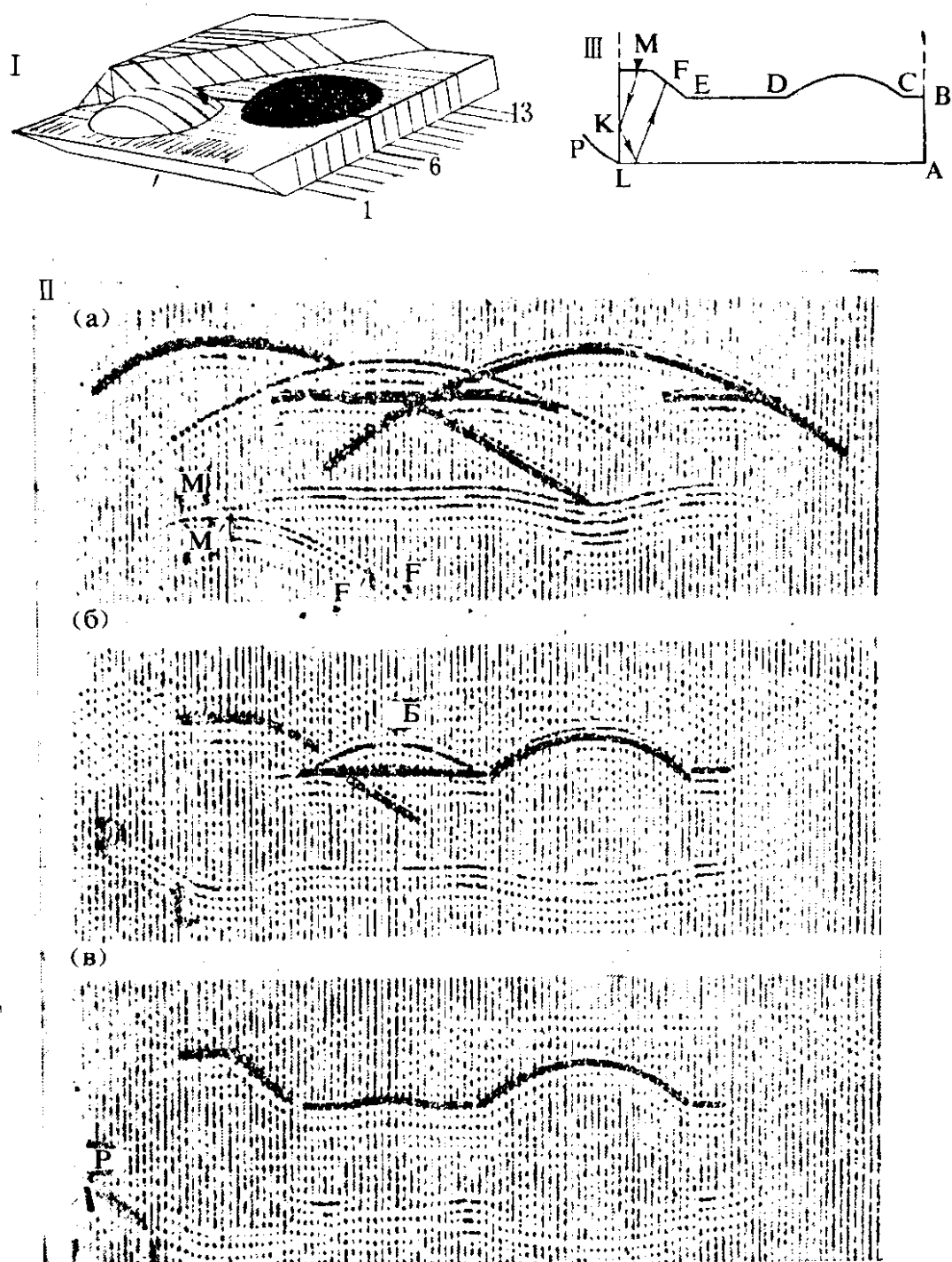


图3 三维物理介质的模拟结果^[40]

I—模型总貌；II—(a)沿剖面(6)的模拟观测结果，(b)二维偏移剖面，(B)三维偏移剖面；III—沿剖面(6)的模型剖面(按时间剖面的比例)；
1~13—剖面

用绕射波进行解释，因为作为绕射单元的应是点 L (图 3 III)。这种情况与前面模型研究结果是有矛盾的，因为绕射波应是从较致密的介质向较疏松的介质中传播时形成的。因此，就出现了这样一个问题：为什么处于和 L 相同条件的点 A 不能形成绕射波？因而有必要研究这种反射的性质。Б.П.沙利莫夫首先提出了一个假设：所研究的波是一种复杂的反射波。作者根据模型条件作出这种复杂反射的理论时距曲线 t_0 结构 (图 3 II (a) 上同相轴 $F' M'$)，与所观测的同相轴 FM 是非常吻合的；该反射的射线示意图见图 3 III。如果将观测波看作是双重反射波的时距曲线 LP，那么用椭圆法按模型的比例尺进行作图，给出的界面就是 LK (图 3 III)。与此同时，在二维和三维偏移时可获得同相轴 LP (图 3 II (b))，该同相轴与图 3 III 中对双重反射波所绘出的同相轴很相似。这些特点可用来解释形成 FM 波的实质：它是界面 KL 和 LA 上先后两次反射的结果。由此可见，这里所引用的模型研究资料为利用绕射波和双重反射波来研究陡倾斜界面，提供了现实的科学依据。

第二节 断裂带地震和地质—地球物理资料的分析

沉积岩系断裂带的地震模型可依据穿过断裂带的钻孔资料，以及钻孔所揭示的断裂带区间内的物理参数资料来建立。作者指出，波罗的海 (Балтийское) 沿岸西北地区 (德国的吕根岛 [Рюген] 和格里曼—巴尔斯克带 [Гримен-Бартская]) 获得的地震和地质—地球物理资料分析结果，是很有意义的。深井 T—1、Л—2 和 Р—2 (吕根岛) 的资

料提供了断裂带中最典型的岩石参数。在地震勘探界流行的看法是：构造断裂具有垂直和近垂直的断层面。许多研究者认为要追踪断裂带的反射是不可能的。但是，在实际地质条件中倾角缓的断裂带并不少于倾角陡的断裂带。希琴泽岛（Хидденее）地区钻孔 P—2、X—3 和 X—5 所得的资料是很有意义的。这三口井距离很近，而且均穿过了同一个断裂带。因此，有可能确定断层面的真倾角，它为 55° 。断层面倾角较小，这和当前地震制图时一般所取的 90° 角是不相符合的。

在吕根岛的所有钻孔中，根据地震测井资料，在断裂区内可观测到垂直时间的初至时间梯度有明显的增大。这种情况证明在断裂带内速度值明显变小。根据揭露断裂带的钻孔 Л—2 的声测井资料，可观测到纵波速度由固结岩层的 5km/s 下降至断裂带中的 $3.0\sim 3.5\text{km/s}$ （图 4）。许多钻孔（T—2，Л—2 等）的测井资料研究结果说明，就厚度而言，在大多数场合下断裂带本身虽是比较薄的，但在与其毗连的上覆 $100\sim 150\text{m}$ 范围内的岩层却受到了严重的破坏。井径测定、电测井及伽马测井资料（图 4）都说明了这一点。取自断裂带的岩芯特点，就是夹层的倾角非常大。例如，从取自钻孔中与断裂带毗连的深度段的岩芯，可见到夹层的倾角一般为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，并逐渐减小至 10° 。在固结围岩中的分层实际上是水平的。

按电测井、伽马测井和井径测定的资料，断裂带的特点是视电阻率变化剧烈。直接由断裂带取得的岩芯样品可用来很好地说明岩石的状况。根据岩芯研究资料，断裂带的特点是裂隙度增高且岩性变化急剧。在断裂带下部角砾岩发育：角砾岩向上过渡成为破碎了的石灰岩，而且岩石破坏程度自

下而上逐渐减弱。在许多场合中，裂隙带有粘土充填。在角砾岩充填裂隙的情况下，可见到严重的断裂和明显的接触面。如果断裂幅度较小，那么裂隙为粘土所充填，在这种情况下接触面就不明显⁽³⁴⁾。图4所示，就是钻孔ЛІ—2揭露

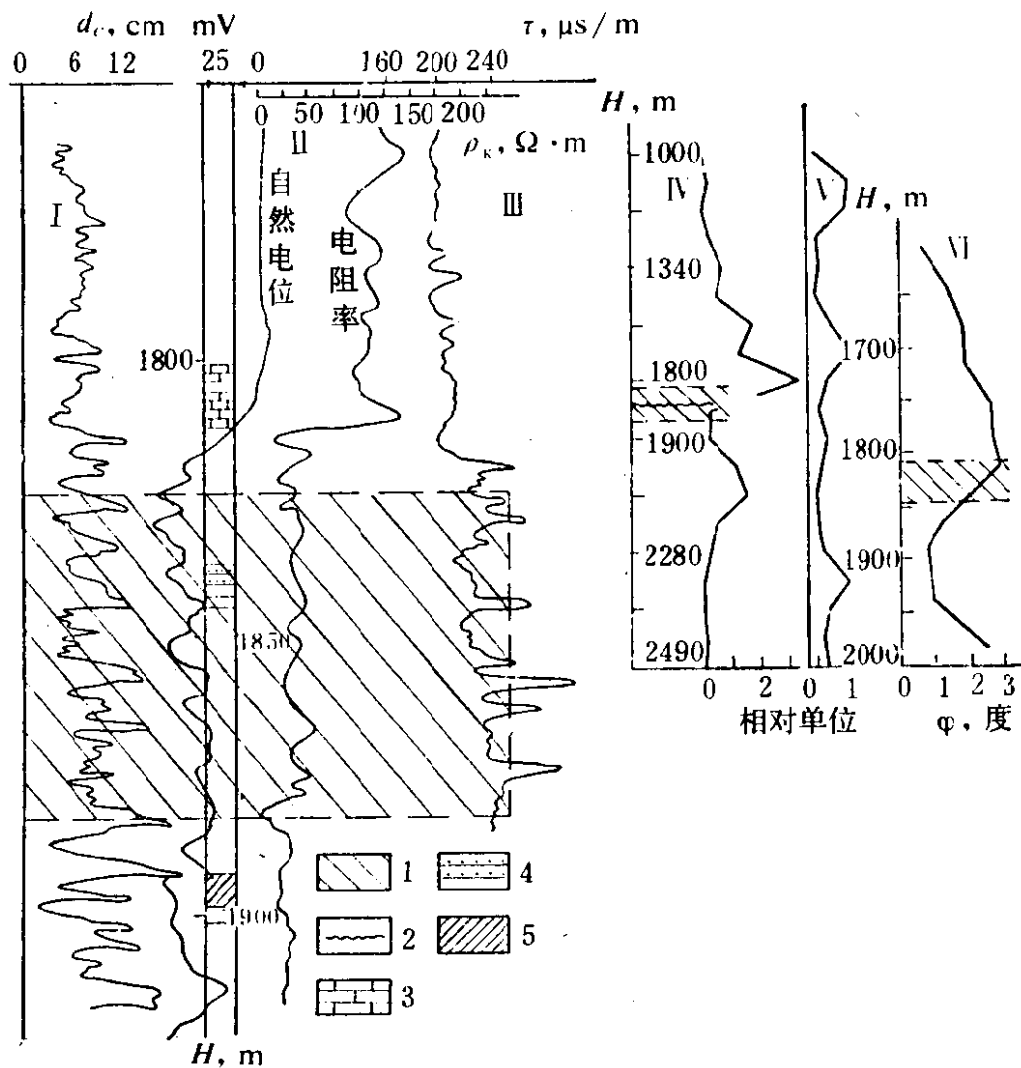


图4 根据钻孔钻探资料得到的断裂带地质—地球物理特征
(德国吕根岛及格里曼—巴尔斯克地区)

I—井径测定曲线；II—电测井；III—声测井；IV—1m岩芯中的裂隙数；V—1m岩芯内的滑动面数；VI—钻孔ЛІ—2在断裂带深度内偏离垂线的情况；1—构造断裂带；2—断裂线；3—石灰岩；4—砂层；5—粘土层

的断裂带深度段的裂隙度的测定结果。图中可观测到裂隙度明显增加，还可观测到方解石充填裂隙数量的增加，也可观测到每米岩芯上的滑动面数量有所增加。岩性变化以及物理—机械性能减弱的范围可达 100~200m。

伏尔加河流域不同地点的许多深钻的实际资料分析结果(据 Б.П.沙利莫夫)说明，该流域裂隙区的可见厚度可达几十米。因而，波罗的海沿岸西北部和伏尔加河流域的实际资料证实了作者早先提出的观点，即断裂带的厚度可能很大，以致可将它看作是独立的岩层或分界面，并进行研究。这种岩层的分界面也可能就是反射面。在断裂带中，由于岩石物理性质急剧变化，特别是密度变化急剧，所以井孔常会弯曲(图 4)。根据岩芯来研究密度是不恰当的，因为断裂带是最典型的弱化岩层，在钻探时会遭到破坏。钻探记录中指出的大量岩石空洞并非是岩石本身特征。但是，实际资料以及地震波吸收参数 β 的测定结果都说明，断裂带的岩石密度是低的。

特别有意义的是钻孔 T—1 的垂直地震剖面资料。在该资料上可观测到过去当作干扰波的规则波。但是，对垂直地震剖面 and 地面地震资料所得的波场与矿场地球物理研究的结果进行分析和对比后，可以看出该波是来自断裂带的一种反射。图 5 所示，就是几张断裂界面反射波地震记录。测线穿过钻孔 Л—2，一条与断裂带正交，另一条沿断裂带走向。在和断裂带走向正交的地震剖面记录上，可划分出波组 I (其速度 $v_k = 4000\text{m/s}$)。这种反射也可在沿走向的剖面上见到，它是具高 v_k 值的多相位反射(图 5 的 1.6~1.7s 处)。