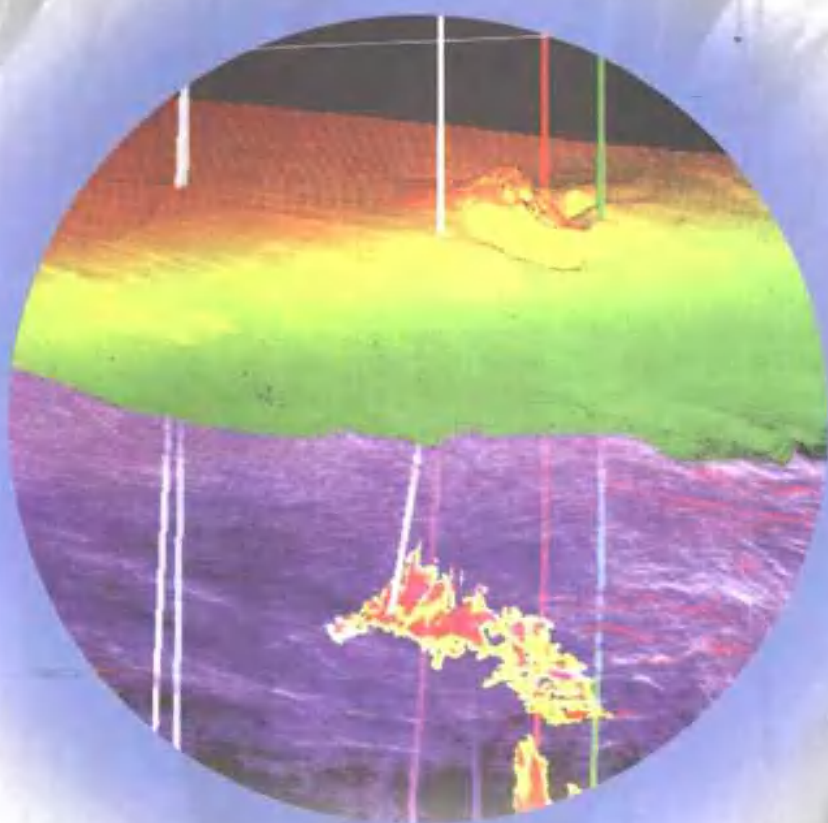


济阳坳陷深层地震 勘探技术研究

赵殿栋 宋玉龙 主 编
马国光 刘泰生 副主编



石油工业出版社

济阳坳陷深层地震 勘探技术研究

赵殿栋 宋玉龙 主 编
马国光 刘泰生 副主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是在中国石化集团公司“九五”重点科研项目“济阳拗陷深层地震勘探技术研究”的成果基础上总结而成。书中详细叙述了此次研究在野外采集方法、深层资料处理以及资料解释和综合研究方面的技术创新。

本书可供地震勘探研究工作人员及高等院校相关师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

济阳拗陷深层地震勘探技术研究/赵殿栋等主编.
北京:石油工业出版社,2002.6
ISBN 7-5021-3653-3

I. 济…

II. 赵…

III. 拗陷-地震勘探-研究

IV. P631.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 094166 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
河北地勘局测绘院印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 290 千字 印 1—1000
2002 年 6 月北京第 1 版 2002 年 6 月河北第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3653-3/TE·2687
定价: 60.00 元

前言

济阳坳陷深层地震勘探技术研究是中国石化集团公司“九五”期间重点科研课题之一，也是胜利油田“九五”期间的重点科研课题之一。物探公司共有 45 名高级工程师和工程师组成项目组，前后有五个地震队在济阳不同地区进行野外采集试验，经过三年多的努力，取得了丰硕的成果。2000 年底，经中国石化集团公司科技发展部组织的专家验收鉴定会上，该课题圆满地完成合同任务，顺利通过专家验收，被鉴定为整体达到国际先进水平。

济阳坳陷是渤海湾盆地内七大生油坳陷之一，并具有明显的复式成藏特点。济阳坳陷的深层油气勘探目标主要是指 3500m 以下的层位，在这个范围内存在的油气藏一般产生于凹陷的深部或低潜山，其地质层位有下第三系孔店组、沙三段及沙四段，还有前第三系的中生界、古生界及太古界。通过 30 多年的实践，深层勘探从 60 年代初期至今，共完钻深探井 372 口，平均探井密度不到 1.4 口/100km²，钻探程度较低，且 70% 深探井集中在沾化凹陷东部。据统计，济阳坳陷深层沙四段预测石油储量为 $(14 \sim 16) \times 10^8 \text{t}$ ，天然气资源量为 $(353 \sim 564) \times 10^8 \text{m}^3$ ，从孔店组到石炭—二叠系预测石油储量为 $7 \times 10^8 \text{t}$ ，天然气储量为 $6266.3 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中煤层气为 $3328.6 \times 10^8 \text{m}^3$ （随着地质认识地深化还有可能增加），足以说明济阳坳陷深层油气资源十分丰富，这是济阳坳陷深层油气勘探的基础。随着中、浅层油气藏勘探程度的不断提高，深层油气藏的勘探已成为当今勘探研究的主要对象，也是今后增储稳产接替阵地的关键所在；因此，深层地震勘探技术研究是胜利油田实现持续发展战略性目标的重大科研课题之一。

济阳坳陷深层油气勘探没有取得突破，其主要原因是对深层区域评价及构造演化、沉积特征和深层油气成藏成因条件认识不足，没有掌握其地质规律，之所以造成这个局面的核心是地震没有获得足以能用于综合研究的剖面。因此，济阳坳陷油气勘探要获得突破，首先要解决地震方法上的突破，所以，首当其冲应该是济阳坳陷深层地震技术研究。通过努力，取得了以下几个方面的技术创新。

1. 野外采集方法研究方面

总结了一套系统的“三小、一中、一多、一调、面元叠加观测方式的施工方式，并在野外施工时强调检波器的埋置条件，尽可能避开干扰的做法。突破了过去深层地震“大排列、大井深、大组合距、高覆盖次数”传统模式，无疑，这是在深层地震采集方法上从理论到实践的一大突破，也是在东部地区首次较系统地进行试验后，而总结出来的一套具有特色的适应东部深层地震采集的施工方法，对指导今后东部地区深层地震采集具有深远的意义。

2. 深层资料处理方面

(1) 紧密围绕着老二维测线，开展深层目标处理，总结了一套“三精、双优”的处理工作流程，对深层反射信号品质的提高有明显的效果。使过去的老资料通过重新目标处理后，剖面质量大为改观，也挖掘了老资料的潜力。“三精”是：精细的多域去噪、精细的速度分析、精细的叠加与偏移。“双优”是：主能量优化叠加技术、可变面元划分优化叠加技术，实现最佳叠加。

(2) 开展了 CRS 面元叠加研究，它是一种与宏观速度模型无关的成像方法，最大的优点是使用描述非均匀介质中双曲面界面反射波的几何关系而实现最佳叠加的目标，而不是像常规叠加需依赖于宏观速度场，是通过另一个技术路线来完成叠加和成像的处理方法。通过从

模型到实际资料的处理,与常规方法处理的剖面对比,CRS面元叠加剖面对深层弱反射信号品质有较大改进,波组特征清楚,地质现象反映真实,深层分辨率大有提高,是地震资料处理中一大技术创新,是本次深层资料处理中的技术闪光点。

3. 资料解释和综合研究方面

针对深层资料解释,总结了5种新方法:①通过岩性测试与速度分析,明确提出济阳凹陷的盐膏层为低速层;②总结和发展、应用了综合标定方法,提高区域大剖面的对比解释精度;③总结和发展了利用三维可视化和相干数据体、波阻抗的“起控制作用,北西向断裂构造带是深层油气勘探突破口”的新观点;④基本认识了济阳凹陷孔店组地层的区带关系,初步认识到济阳凹陷孔店组二段烃源岩的分布关系及生油能力;⑤明确了济阳凹陷深层油气勘探有利勘探目标14个,预测圈闭资源量:石油 $4890 \times 10^4 \text{t}$,气 $1020 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

本书系统地总结了3年多济阳凹陷深层地震勘探技术研究的丰富成果,全书共分上、中、下三部分,上篇主要是深层地震野外采集技术,共分四章;中篇主要是深层地震资料处理技术,共分二章;下篇主要是深层地震资料解释与综合研究,共分四章。

济阳凹陷深层地震勘探技术研究是一个庞大的系统工程,包括资料采集、资料处理、解释和综合研究,包括理论、方法、技术、工艺等措施的各个领域,也包括软、硬件的各个环节。项目组的全体人员,本着为企业生存与发展的技术创新精神,本着为油田持续稳定发展再做贡献的主人翁态度,本着为发展物探技术保持其在油气勘探中始终处于领先地位的责任感,经过3年多的努力,发扬不畏艰难、锲而不舍和科研团队精神,共同努力取得了丰硕成果。但是,深层地震勘探技术研究是一个长期任务,我们将继续努力坚持下去,发挥聪明才智,一定能把这个世界级的物探技术难点攻下来,以更优秀的科研成果,迎接我国东部地区深层油气勘探新的曙光。

济阳凹陷深层地震技术研究,得到了中国石化集团公司、中国石油天然气集团公司各级领导的关心和支持,得到了李庆忠、俞寿朋等物探老专家的技术指导,得到了胜利石油管理局科技处、勘探事业部、物探公司、计算中心等各级领导的关心和支持,得到了山东机械厂研究所、青岛海洋大学、石油大学(北京)、石油大学(华东)、同济大学、西安交通大学、西安仪器厂、煤炭研究院、中国地质大学、长春科技大学等单位的大力协作,在此深表感谢!

编 者

2002年5月18日

目 录

上篇 深层地震野外采集技术

第一章 深层吸收与衰减系数计算方法研究	(3)
第一节 吸收与衰减模型的制作	(3)
第二节 衰减与吸收系数及反射波特征	(7)
第二章 深层干扰及噪音特征研究	(16)
第一节 深层干扰波的形成机制、传播和衰减规律	(16)
第二节 深层干扰波的压制方法及效果	(19)
第三章 深层多级延迟爆炸震源的研究与应用	(22)
第一节 深层多级延迟爆炸震源的原理	(22)
第二节 深层多级延迟爆炸震源试验的理论分析	(26)
第三节 深层多级延迟爆炸震源的应用效果与结论	(34)
第四章 “面元叠加”采集技术研究与应用	(37)
第一节 方法原理与技术特点	(37)
第二节 野外采集参数论证	(39)
第三节 采集实例及应用效果	(43)

中篇 深层地震资料处理技术

第五章 深层资料处理方法与效果分析	(53)
第一节 深层地震信号特征分析	(53)
第二节 深层信号增强与噪音衰减	(58)
第三节 深层信号叠加成像	(70)
第四节 深层地震资料处理流程	(86)
第五节 实际资料处理效果分析	(86)
第六章 共反射面元 (CRS) 叠加技术	(94)
第一节 方法原理	(94)
第二节 实现过程及处理流程	(100)
第三节 模型试验结果	(102)

第四节 实际资料处理效果.....	(107)
-------------------	-------

下篇 深层地震资料解释与综合研究

第七章 深层地震资料解释基础研究.....	(111)
第一节 岩石物性与地震波传播速度.....	(111)
第二节 深层地震资料解释.....	(113)
第八章 深层区域地质特征.....	(119)
第一节 构造特征及其演化过程.....	(119)
第二节 盆地形成机制与演化.....	(127)
第三节 孔店—沙四期原型盆地分析.....	(131)
第四节 层序地层学分析.....	(138)
第九章 深层油气成藏规律.....	(144)
第一节 烃源岩分布及生烃能力.....	(144)
第二节 储集层与生、储、盖配置.....	(157)
第三节 圈闭条件及油气藏类型.....	(159)
第四节 油气富集规律.....	(160)
第十章 深层油气勘探成果与目标评价.....	(164)
第一节 沾化、车镇凹陷.....	(164)
第二节 惠民凹陷.....	(168)
第三节 东营凹陷.....	(169)
结论与建议.....	(173)
参考文献.....	(177)

上 篇

深层地震野外采集技术

原书空白页

第一章 深层吸收与衰减系数计算方法研究

地震波在地下的传播过程是一个十分复杂的过程，这个过程中会引起地震波频率、振幅、相位和极性的变化。研究深层地震信号的衰减与吸收规律，对地震观测方法研究和地震数据处理、地震剖面解释都有着十分重要的意义。

根据沉积特征，确定了以下工作步骤：

(1) 根据声波测井和 VSP 测井资料进行详细分层，确定每一层的 V_p 层速度，建立层速度剖面，建立一个大致符合实际的吸收衰减模型；

(2) 研究地震波经过不同地层的变化情况，包括频率、振幅、相位、极性的变化情况；

(3) 济阳拗陷深层地层衰减与吸收系数特征及反射波特征研究。

通过对沾化凹陷几口井的研究，首先建立了吸收衰减模型，研究了该区的吸收衰减规律，并拓展到济阳拗陷，形成了一套制作吸收衰减模型、研究深层反射信号特征的方法。

第一节 吸收与衰减模型的制作

一、基本原理

1. 反射和透射

如图 1-1-1 所示，用 ρ_1 、 ρ_2 代表两种介质的密度，用 V_1 、 V_2 代表波在两种介质中的速度，则密度与速度的乘积称为波阻抗，即 $Z_i = \rho_i \times V_i$ 。

研究表明，界面两侧的介质的波阻抗只有在不相等的情况下地震波才会发生反射，两者差别越大，反射波越强。

2. 反射和透射定律

反射线与入射线位于同一平面内，反射角等于入射角，这被称为反射定律。

公式 $\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} = p$ (式中， θ_1 为入射角； θ_2 为透射角； V_1 、 V_2 为界面两侧的速度) 叫做透射定律，也称为斯内尔 (Snell) 定律，斯内尔定律对于转换波依然成立， p 被称作射线参数。当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时，就是全发射，全反射时会出现一个盲区，盲区的半径是

$$2 \times h \times \tan \theta$$

式中， h 为波源到界面的垂直距离， θ 为入射角。

二、关于波动的一些概念

1. 波函数

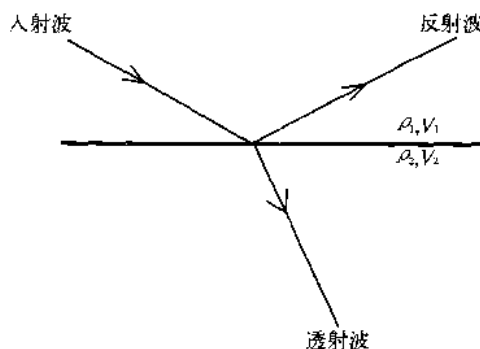


图 1-1-1 反射与透射示意图

$$f(x, y, z, t) = A(x, y, z) \times F\left[t - \frac{r(x, y, z)}{V}\right]$$

式中, $A(x, y, z)$ 为波的振幅; $r(x, y, z)$ 为原点至波面的距离; F 为任意函数; t 为时间; V 为波速。

2. 波的相位

在波函数中, $\tau = t - \frac{r(x, y, z)}{V}$ 被称为相位。

3. 波的能量

波通过介质时, 会产生和介质波动有关的能量, 这也许是波的一个最重要的特征。谐波的能量密度为

$$E = \frac{1}{2} \times \rho \times \omega^2 \times A^2 = 2 \times \pi^2 \times \rho \times f^2 \times A^2$$

式中, ρ 为介质密度; ω 为圆频率; A 为波的振幅; f 为波的频率。

因此, 能量密度和介质的密度成正比, 和振幅的平方成正比, 和波的频率的平方也成正比。

三、界面处的能量分配

1. 边界条件

当波传到两种介质组成的界面时会产生反射和透射, 而且在这两种介质的分界面上, 应力和位移必定连续。

2. 界面处的能量分配

地震勘探中的主要现象是能量在分界面处的重新分配。边界条件决定了能量如何在反射波和透射波之间进行分配。

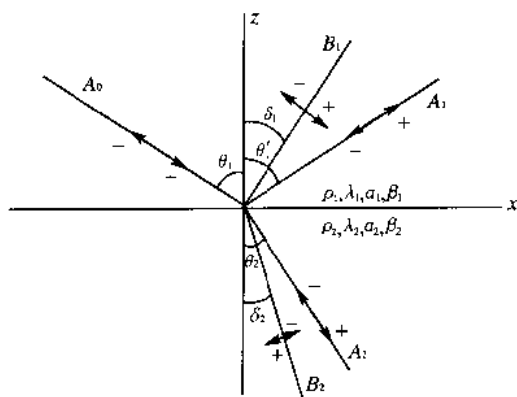


图 1-1-2 当 P 波入射时, 在界面处产生的各种波

一般说来, 在一个纵波入射到反射界面时, 会产生反射纵波、透射纵波、反射横波和透射横波 (后两种被称为转换波)。如图 1-1-2 所示, A_0 、 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 分别是入射 P 波、反射 P 波、透射 P 波、反射 S 波、透射 S 波的振幅; θ_1 、 θ_2 、 δ_1 、 δ_2 是 P 波入射角、P 波透射角、转换 S 波反射角、转换 S 波透射角; 假设波在 xz 平面传播, 反射界面是 xy 平面。 α 、 β 、 λ 、 ρ 分别是 P 波速度、S 波速度、波长、介质密度。将 Z 成为纵波波阻抗, W 称为横波波阻抗。

由 Zoeppritz 方程组:

$$-A_0 \times \cos \theta_1 + A_1 \cos \theta_1 - B_1 \times \sin \delta_1 = -A_2 \times \cos \theta_2 - B_2 \times \sin \delta_2$$

$$A_0 \times \sin \theta_1 + A_1 \sin \theta_1 - B_1 \times \cos \delta_1 = A_2 \times \sin \theta_2 - B_2 \times \cos \delta_2$$

$$(A_0 + A_1) \times Z_1 \times \cos 2\delta_1 - B_1 \times W_1 \times \sin 2\delta_1 = A_2 \times Z_2 \times \cos 2\delta_2 + B_2 \times W_2 \times \sin 2\delta_2$$

$$\frac{\beta_1}{\alpha_1} \times W_1 \times (-A_0 + A_1) \times \sin 2\delta_1 + B_1 \times W_1 \times \cos 2\delta_1 = -\frac{\beta_2}{\alpha_2} \times (W_2 \times A_2 \times \sin 2\theta_2 + B_2 \times W_2 \times \cos 2\delta_2)$$

如果一个界面两边介质的密度 ρ 、纵波速度 α 、横波速度 β 已知, 一个振幅为 A_0 的纵波以 θ_1 的角度入射到分界面上, 根据斯内尔定律可以求得反射角和透射角 θ_i 以及转换波的 δ_i 。由 Zoeppritz 方程组就可以求出反射波和透射波的振幅。

在垂直入射时, 由于不产生转换波, 情况非常简单, 反射能量 $E_R = R^2$, 透射能量 $E_T = \frac{Z_2}{Z_1} \times T^2$ 。反射系数 $R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$, 透射系数 $T = \frac{2 \times Z_1}{Z_2 + Z_1}$ 。显然, $E_R + E_T = 1$ 。如果交换 Z_1 、 Z_2 , 反射能量和透射能量的表示式不变, 因此能量的分配与入射波在何种介质中没有关系。当两层介质波阻抗相等时, 所有能量全部透射。两层介质波阻抗相差越大, 反射能量越强。当上层介质波阻抗大于下层介质时, 会发生相位翻转, 出现所谓的半波损失。

在非垂直入射时, 情况比较复杂, 振幅随入射角会发生变化。当纵波入射到介质分界面上, 在入射角一定的情况下, 如果纵波和横波在两种介质中的速度已知, 由 Zoeppritz 方程组可以求出透射纵波、透射横波、反射横波的振幅。

在分界面上能量守恒的关系式是:

$$R_{pp}^2 + \frac{\sin 2\delta_1}{\sin 2\theta_1} \times R_{ps}^2 + \frac{\rho_2 \sin 2\theta_2}{\rho_1 \sin 2\theta_1} \times T_{pp}^2 + \frac{\rho_2 \sin 2\delta_2}{\rho_1 \sin 2\theta_1} \times T_{ps}^2 = 1$$

式中, R_{pp} 为纵波的反射系数; R_{ps} 为转换横波的反射系数; T_{pp} 为纵波的透射系数; T_{ps} 为转换横波的透射系数。

四、吸收衰减模型

地震波在每层介质中的速度不同, 每层介质的密度也不同, 从而影响到介质对地震波的吸收、反射系数、透射系数等的变化; 另外由于地层厚度差异, 导致几何扩散影响程度的变化。这些因素在众多影响地震反射波振幅的因素中占主要地位。

将 Z 定义为波阻抗, 有: $Z_i = \rho_i \times V_i$ 。研究表明, 界面两侧介质的波阻抗只有在不相等的情况下地震波才会发生反射, 并且两者差别愈大, 反射波愈强。因此只有波阻抗界面才是反射界面, 速度界面不一定是反射界面。

根据这个原则, 结合 VSP 测井资料、声波测井曲线、综合录井图、地质分层建立一个义 161 井的分层剖面 (表 1-1-1、图 1-1-3)。然后, 研究每一层的纵波速度的变化; 确定每一层的地球物理参数, 比如密度等, 从而建立一个大致符合实际的吸收衰减模型。

从经过计算得到的义 161 井品质因子与衰减系数曲线和分层剖面的对应关系上来看, 按照以上原则进行分层是比较合适的 (图 1-1-4 和图 1-1-5)。

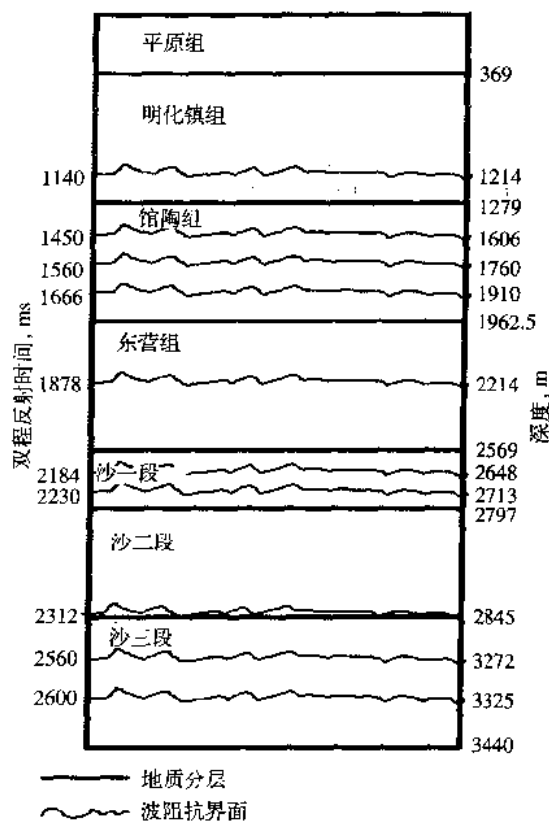


图 1-1-3 义 161 井分层剖面

表 1-1-1 义 161 井分层参数

终止深度 m	双程时间 ms	平均速度 m/s	密度 g/cm ³	备 注
369	358	2061.4525	2.088839289	平原组底
1214	1140	2161.1253	2.113643224	强波阻抗界面
1279	1194	2407.4074	2.171446291	明化镇组底 T ₀
1606	1448	2574.8031	2.208247268	强波阻抗界面
1760	1552	2961.5385	2.286867688	强波阻抗界面
1910	1666	2631.5789	2.220321144	强波阻抗界面
1962.5	1700	3088.2353	2.310943296	馆陶组底 T ₁
2214	1872	2924.4186	2.279667871	强波阻抗界面
2569	2120	2862.9032	2.267583879	东杏组底 T ₂ '
2648	2174	2925.9259	2.279961564	强波阻抗界面
2713	2226	2500	2.192031022	强波阻抗界面
2797	2284	2896.5517	2.274217598	沙一段底 T ₂
2845	2314	3200	2.331573918	沙二段底 T ₃
3272	2570	3335.9375	2.355950548	强波阻抗界面
3325	2602	3312.5	2.351801514	强波阻抗界面
3440	2610	3750	2.425881099	强波阻抗界面

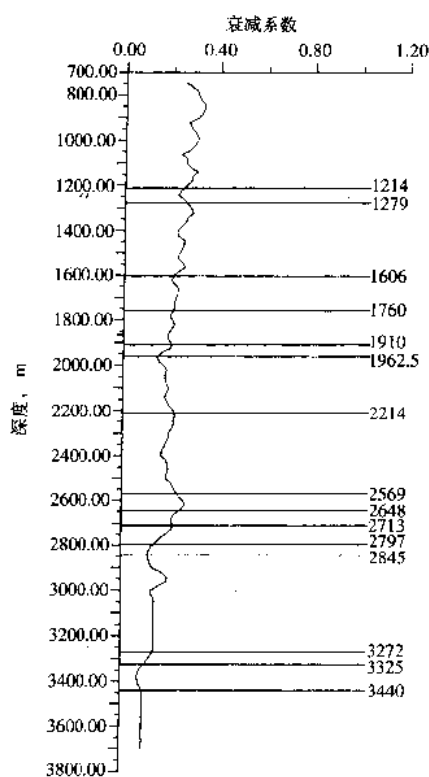


图 1-1-4 义 161 井衰减系数与波阻抗界面

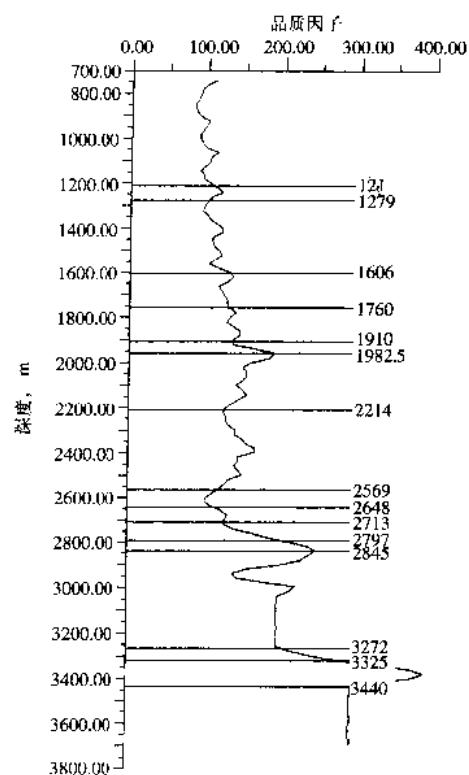


图 1-1-5 义 161 井品质因子与波阻抗界面

第二节 衰减与吸收系数及反射波特征

一、影响反射波振幅的因素

地震记录的形成要经历震源激发产生地震波，地震波在地下传播，地震波返回地面被检波器接收，最后被仪器记录下来这样一个过程。地震记录实际上是同时到达检波器的各种波叠加的结果。因此，地震波从激发到最终形成地震记录是一个十分复杂的过程，这个过程中会产生地震波能量的变化，也就是说会发生地震波振幅的变化。振幅的变化与许多因素有关。比如：震源强度与耦合、球形扩散、反射系数、叠加在一起的噪音、反射系数随入射角的变化、吸收、反射层弯曲与粗糙、薄层微屈多次波、透射损失、散射、组合方向、不同同相轴间的干扰、检波器灵敏度与耦合、组合方向、设备均衡等（图 1-2-1）。

1. 激发条件

理论研究和生产实践已经证明：地震波初始振幅与介质的切变模量成正比。由于切变模量为：

$$\mu = \frac{\rho \times V^2 - \lambda}{2}$$

式中， ρ 为介质密度； λ 为介质的拉梅系数； V 为介质中的波速。因此介质波速越高，密度越大，激发的初始振幅越小。在含水砂层或粘土中激发要比在坚硬的岩石中激发获得的能量强。而由于低速带的密度小，波速慢，造成能量的吸收

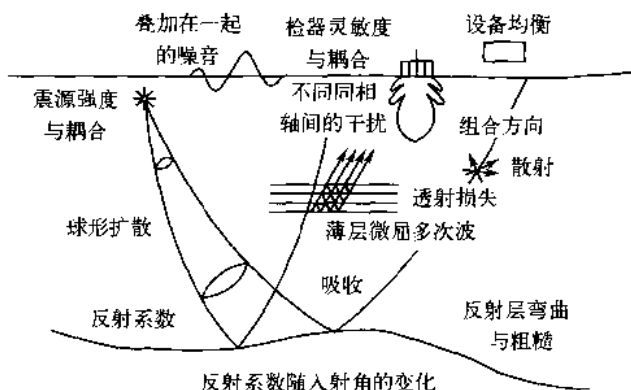


图 1-2-1 影响振幅的因素

严重，因而该在其下激发。井深需要考虑表层地层的吸收特性，然后结合其它因素来确定。

2. 接收条件

接收条件主要包括检波器类型、检波器的组合方式、检波器的埋置深度和仪器的频率特性等。由于表层地层对地震波的衰减十分严重，检波器的埋置同样需要考虑表层的吸收特性。

3. 微屈多次波

当地震波通过薄层组时，会产生微屈多次波。由于微屈多次波的定量讨论十分困难，很难将它对振幅影响的程度计算清楚。

4. 各种噪音的干扰

噪音对振幅的影响是多种多样的，可以有很多方法进行压制，但是很难完全消除，因此野外生产时要注意排除可以避免的各种干扰。

5. 几何扩散

定义单位时间内，在垂直余波传播方向的单位面积上能量的通量为能量强度 I 。因此，单位时间、单位面积上能量的通量为：

$$I = E \times V$$

式中， E 为能量密度； V 为波的传播速度。

对于简谐波有： $I = \frac{1}{2} \times \rho \times \omega^2 \times A^2 = 2 \times \pi^2 \times \rho \times f^2 \times A^2$

单位时间内，能量的总流量是能量强度和穿过面积的乘积（图 1-2-2），因此：

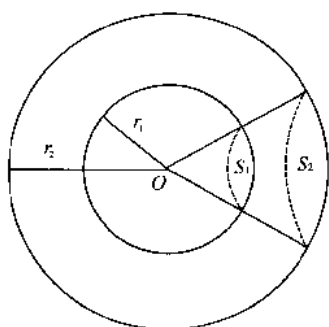


图 1-2-2 能量强度与传播距离的关系

$$I_1 \times S_1 = I_2 \times S_2$$

因为 S_1 和 S_2 与它们半径的平方成正比，所以：

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

联合能量强度的公式，得到：

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$$

由此可见，几何扩散使球面波强度和能量密度随距离的平方成反比衰减，这种现象称为球面扩散。

能量比和能量强度常用 dB 表示： $E = 10 \lg \frac{E_2}{E_1} = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$ ，由于能量与振幅的平方成正比，分贝又可以表示为： $E = 20 \lg \frac{A_2}{A_1}$ ，若用自然对数，则： $E = 8.686 \times \ln \frac{A_2}{A_1}$ 。

6. 吸收

当地震波在地下岩层中传播时，会使波的弹性逐渐被介质吸收，最后都转化成了热能，这个过程称为吸收。

(1) 岩石对地震波的吸收作用，使得地震波的振幅呈指数衰减。所以，可以把因吸收引起的振幅衰减表示为：

$$A = A_0 \times e^{-\alpha x}$$

式中， A 、 A_0 是距离为 x 的两点处平面波的振幅值； α 为吸收系数。

吸收的另外一种表达形式是振幅随时间的衰减。为了把它和吸收系数联系起来，假设波是周期性的：

$$A = A_0 \times e^{-ht} \times \cos(2\pi vt)$$

它表示在某一个固定位置的吸收， h 称为阻尼因子。

(2) 对数衰减 δ 是弹性波每传播一个周期，其振幅比值的自然对数量为

$$\delta = \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)$$

用阻尼因子来表达，有：

$$\delta = hT = \frac{h}{v} = 2\pi \frac{h}{\omega}$$

式中， T 为周期。

(3) 品质因子 Q 是岩石对于弹性波吸收特性的一种表达方式， $Q = 2\pi \times \frac{E}{\Delta E}$

因为能量与振幅的平方成正比， $E = E_0 \times e^{-2ht}$ ， $\frac{\Delta E}{E_0} = 2 \times h \times \Delta t$ 。

令 $\Delta t = T$ ，得到

$$Q = \frac{\pi}{hT} = \frac{\pi}{\delta}$$

在一个周期内，波传播的距离是一个波长。如果能量的衰减完全是由吸收造成的，就有 $h \times T = \alpha \times \lambda$ ，所以吸收系数 α 、对数缩减量 δ 、品质因子 Q 三者之间的关系就是：

$$Q = \frac{\pi}{\alpha \lambda} = \frac{\omega}{2 \times \alpha \times v} = \frac{\pi}{\delta}$$

(4) 影响岩石吸收特性的因素：①温度与压力的增大会使吸收减少， Q 增大；②震源附近，波动振幅很强，吸收强烈， Q 很小；③岩性的影响中灰岩吸收小，砂岩吸收大，泥岩介于其中；④岩石中的孔隙形状与裂缝发育程度也极大地影响 Q 值的变化；⑤频率不同， Q 值不同；⑥饱和度与液体性质，对于纵波，随含水量的增加吸收增加；⑦孔隙中流体的性质如粘度对吸收也有影响。

7. 中间界面的能量分配

如果一个界面两边介质的密度、纵波和横波速度已知，并且入射角已知的纵波，根据斯内尔定律可以求得反射角和透射角以及转换波的反射角和透射角。如果入射振幅已知，由 Zoeppritz 方程组可以求出反射波和透射波的振幅。

8. 反射界面形态产生的聚焦和发散作用

当地震波入射到弯曲界面时，反射振幅受界面曲率的影响发生变化。反射界面向下凹时，反射波能量集中，振幅增强，界面凸时，反射波能量分散，振幅减弱。

9. 岩相的变化

岩相的横向变化通常会引起界面反射系数的横向变化，因而影响反射波的振幅。

10. 波的干涉

当反射波与其它波同时到达地面检波器时，会引起波的干涉。

二、波的衰减

综合考虑影响地震波振幅的因素，其中发散、吸收、中间界面的能量分配是地震波在地下传播过程中引起能量衰减的主要因素。针对这三个因素，我们分别对他们引起的地震波能量衰减量进行计算。

1. 几何扩散

几何扩散一般是导致振幅随时间变化的主要因素。能量发生扩散，波的强度减少而波场的总能量不变。由于地震波的速度随深度增大而增加，能量扩散会加快，使振幅衰减变大。几何扩散引起地震波的能量衰减分贝数可以由公式 $E = 8.686 \times \ln \frac{A_2}{A_1}$ 计算。可以看出它与对数缩减量在计算公式上是完全一样的，但是由于几何扩散与频率无关，因此不能用对数缩减量的计算方法来计算几何扩散。考虑到公式 $\frac{I_2}{I_1} = \frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2$ 和衰减分贝数公式 $E = 10 \lg \frac{E_2}{E_1} = 10 \lg \frac{I_2}{I_1}$ ，可以得到衰减 $E = 20 \lg \frac{r_1}{r_2} = 8.686 \times \ln \frac{r_1}{r_2}$ 。

几何扩散在义 161 井的影响见图 1-2-3。

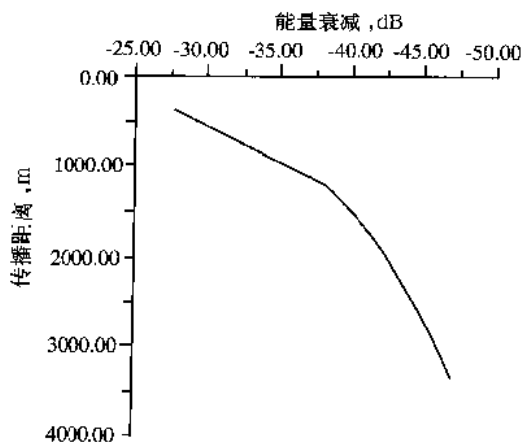


图 1-2-3 几何扩散引起的能量衰减与传播距离关系

可见几何扩散引起的能量衰减随着传播距离的增加而增大, 浅层几何扩散的影响较深层要大得多, 而且在浅层几何扩散的影响较吸收和反射系数的影响要大; 在深层, 它的影响要小于后两者 (表 1-2-1)。例如: 假设震源在 15m 处激发, 此深度能量衰减为 0dB, 产生的地震波传播到平原组的底部 (369m), 要衰减 28dB; 而传播到 3340m 处, 多了将近 3000m 的传播距离, 能量衰减却只多了 20dB, 达到 47dB。

表 1-2-1 义 161 井吸收、几何扩散及反射的衰减量

界面深度 m	地层厚度 m	10Hz 的吸收 dB	100Hz 的吸收 dB	几何扩散 dB	反射衰减 dB
369	369	-0.710358277	-7.10358277	-27.819056	-30.60273
1214	845	-1.398577753	-13.9857775	-38.163033	-23.43341
1279	65	-0.076165871	-0.76165871	-38.616076	-27.53719
1606	327	-0.309010049	-3.09010049	-40.593601	-21.18593
1760	154	-0.092997413	-0.92997413	-41.388954	-22.65133
1910	150	-0.132191801	-1.32191801	-42.099377	-20.02803
1962.5	52.5	-0.027726295	-0.27726295	-42.334906	-29.35717
2214	252	-0.158131073	-1.58131073	-43.382278	-37.53186
2569	355	-0.238920144	-2.38920144	-44.674025	-37.32387
2648	79	-0.049589553	-0.49589553	-44.937105	-20.17464
2713	65	-0.067501136	-0.67501136	-45.147744	-20.74693
2797	84	-0.054458405	-0.54458405	-45.412601	-24.12583
2845	48	-0.022623878	-0.22623878	-45.560399	-31.70188
3272	427	-0.176171775	-1.76171775	-46.775035	-47.11799
3325	53	-0.022365715	-0.22365715	-46.914604	
3340	15	-0.004255954	-0.04255954	-46.953701	
累计		-3.541045093	-35.4104509		

注: 几何扩散的计算以离地面 15m 为基准, 即地面下 15m 的衰减量为 0dB; 反射衰减假设地震波垂直入射到界面。

2. 吸收

而吸收将能量转化成热量, 使波动能量消失。由吸收造成的能量衰减可以由下列方法得到:

$$(1) \quad \frac{1}{Q} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\alpha \times \lambda}{\pi} = \frac{V \times \alpha}{\pi \times f} = \frac{B}{27.29}$$

式中, α 为吸收系数; β 为衰减系数; δ 为对数缩减量; λ 为波长; f 为频率; Q 为品质因子。

(2) 根据 Waters 的公式 $Q = CV_p^m$ (式中 C 、 m 是常数), 建立品质因子与纵波层速度之间的关系。

$$Q \approx 3.516 \times V_p^{2.2} \times 10^{-6}$$

$$\beta \approx 7.759 \times V_p^{-2.2} \times 10^6$$

式中, V_p 单位是 m/s, H 单位是 m。

(3) 按照开始建立的吸收衰减模型, 工区被分为若干小层, 每层厚度 H 已知, 就可以得到层内单程旅行时 Δt (以 s 为单位):

$$\Delta t = \frac{H}{V_p}$$