

The book cover features a dark blue background with a central vertical white line ending in an upward-pointing arrow. This line is flanked by two large, stylized, overlapping shapes that resemble a cross or a four-pointed star. The left shape is primarily yellow with green accents, and the right shape is primarily green with yellow accents. The overall design is geometric and modern.

# 垂直地震 剖面方法

朱光明 编

石油工业出版社

# 垂直地震剖面方法

朱光明 编

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书是在作者进行垂直地震剖面方法研究的基础上，搜集了国内外大量有关资料及自己的科研成果，经过细致的整理、汇总编写而成，比较集中地反映了该方法近十年来发展的现状。全书共分四章，前二章介绍了 VSP 资料的野外采集和室内处理，后二章则深入详细地叙述了 VSP 的正演模型及资料解释和应用，对书中主要公式均做了推导并列于附录中。本书既是物探工作者学习垂直地震剖面方法的入门参考书，又是掌握、深入研究这一新技术的良师益友。

## 垂直地震剖面方法

朱 光 明 编

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

昊海印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 20<sup>8</sup>/<sub>4</sub>印张 629千字 印1-2,200

1988年2月北京第1版 1988年2月北京第1次印刷

书号：15037·2875 定价：5.00元

ISBN 7-5021-0031-8/TE·32

## 前 言

1973年，苏联科学院院士加尔彼林的专著——垂直地震剖面，从英译本再译成中译本已由石油工业出版社出版，读者非常欢迎这本经典的系统论述垂直地震剖面的专著，但同时也希望进一步了解垂直地震剖面法最近一些年在西方得到的发展。为适应这种要求，我整理了一篇短文《垂直地震剖面从苏联到欧美的发展》，文中概述了自七十年代末以来垂直地震剖面（简称 VSP）方法在野外采集、资料处理和解释应用三方面的发展。这本小册子印了三次，很快发完。许多同志建议我重写一本较详细的读物，更系统地介绍 VSP 方法几个方面当前发展的现状，石油工业出版社也愿意再签订一个合同。我起初有些犹豫，因为国内尚处于初始准备阶段，还没有实际资料和经验。我本人的实际经验也较少。但是各方面不断给我鼓励和支持。经过大约一年的酝酿，我进一步收集了当时在国内能收集到的大部分文献，到现场参加了国内进行的多次 VSP 试验，自己对 VSP 模型也作了较多的研究。在这过程中，我也感到，尽快有一本读物，确实是国内 VSP 技术发展的急需。虽然材料中可能有些内容不够准确，甚至个别有误，但与社会的需要相比，有一本读物仍然更为有利。于是，我起草了一个提纲，并决定大部或全部引用国外文献资料。1985年初开始动笔。原计划半年写完，结果到夏天只完成了前两章的内容，并且进度越来越慢。当时面临着一个困难，即 VSP 技术几乎“每天”都在发展，因而使原来想反映 VSP 方法最新进展的愿望很难实现。开始我还作努力，后来只好放弃这一打算，而将收集的资料大部分限制到 1984 年。当然，1984 年以后的发展必然会修改、补充和完善原有的技术，从而也修改这本书。

在编写过程中，读到了 *Hardage* 编的《垂直地震剖面第 I 部分——原理》及 *Balch* 和 *Lee* 等合编的《垂直地震剖面技术、应用和史例》，这两本著作作为编写本书提供了很大方便。对这两书较多的引用以及对其他文献材料的引用都列在分章编排的参考文献中。

全书共分四章。第一章 VSP 的野外资料采集，全面介绍了 VSP 震源、VSP 观测井、VSP 井下仪器和地面记录仪器、VSP 观测方法，并对 VSP 观测中所遇到的干扰波作了较多的分析。第二章 VSP 的资料处理，介绍了几种 VSP 资料处理流程，着重讨论了初至拾取、子波整形、振幅处理、分离上行波和下行波、反褶积、走廊迭加、最大相干滤波和 VSP 波阻抗测井等常规处理项目，并以较多的篇幅专门讨论了偏移距 VSP 资料的处理和三分量 VSP 资料的处理。这两章可看成 VSP 的基本部分，内容比较成熟，可帮助读者较快地入门。第三章 VSP 正演模型，分别介绍了一维 VSP 合成记录、二维 VSP 射线追踪模型和 VSP 波动方程模型。引用的材料仍大部分取自国外，但包括我们自己的一些研究成果。鉴于国内原有教科书关于射线理论的内容过于简单，所以用较多的篇幅补充了近年来射线理论的发展，并将有关的几个主要公式作了详细的推导列在附录中。除此之外，考虑到某些概念，例如反射系数和衰减等，在 VSP 资料处理和解释中至关重要，而部分读者可能比较生疏，所以也作了较多的必要的讨论。第四章 VSP 资料的解释和应用，分别讨论了 VSP 资料对改善地面地震资料质量，以及对井旁构造细节和井旁地层岩性方面的解释和应用，并介绍了 VSP 资料在钻井工程和油田开发等方面的一些可能应用。后面这两章可看成

VSP 发展的较深入部分，尽管有些内容还不太成熟，但仍然受到人们的关注。阅读前两章只需要一般的数学物理知识，阅读第三章需要多一些准备。

西北大学赵圣亮副教授审阅了全书，提出了很多有益的建议，教研室几位老师帮助誊清原稿，在此一并致谢。

编者水平有限，错误和不当之处，敬请读者指正。

编者

一九八六年十一月

# 目 录

引论 .....	1
1. 垂直地震剖面的基本概念 .....	1
2. 历史的回顾与展望 .....	3
参考文献 .....	5
第一章 VSP 的野外资料采集 .....	7
§1.1 地震波的激发——震源 .....	7
1. VSP 震源选择的一般原则 .....	7
2. 炸药震源 .....	8
3. 振动震源 .....	10
4. 气枪 .....	10
5. 电火花震源 .....	17
6. 横波 VSP 震源 .....	17
§1.2 地震波的接收 .....	18
1. VSP 观测井 .....	18
2. 井下仪器 .....	21
3. 地面记录系统 .....	28
§1.3 干扰波分析 .....	30
1. 井筒波 .....	30
2. 井下仪器与地层耦合不良引起的噪声 .....	41
3. 电缆波 .....	43
4. 套管波 .....	43
5. 其它噪声 .....	45
§1.4 观测方法 .....	46
1. 观测系统 .....	46
2. 采样间隔 .....	49
3. 野外施工过程 .....	55
附录A 关于 54 度正交型三分量检波器测得的资料和 XYZ 正交型三分量资料之 间的换算 .....	60
参考文献 .....	61
第二章 VSP 的资料处理 .....	64
§2.1 VSP 资料处理流程 .....	69
§2.2 常规处理 .....	70
1. 同深度迭加 .....	70

2.	初至拾取	72
3.	静态时移和排齐	74
4.	震源子波整形	78
5.	频谱分析和带通滤波	79
6.	振幅处理	79
7.	分离上行波和下行波	84
8.	反褶积	100
9.	垂直求和或迭加	106
10.	最大相干滤波	109
11.	传递函数	112
12.	波阻抗测井曲线的估算	116
§ 2.3	其它处理	117
1.	偏移距 VSP 资料的处理	117
2.	三分量 VSP 资料的处理	143
参考文献		155
第三章 VSP的正演模型		159
§ 3.1	一维VSP合成记录	159
1.	SVSP 方法	160
2.	包括吸收和波散效应的VSP合成记录	177
3.	非法线入射情况下的VSP合成记录	191
§ 3.2	VSP射线理论模型	208
1.	射线理论简述	208
2.	两点射线追踪确定地震波的射线路径	226
3.	VSP模型的制作	236
§ 3.3	VSP 波动方程模拟	241
1.	离散波数法	242
2.	傅里叶合成	253
3.	克希霍夫积分法合成VSP	256
4.	有限差分法	257
5.	有限元法合成VSP记录	267
附录A	关于(3.2.26)式的推导	280
附录B	关于P波振幅系数主分量的推导	282
附录C	传输方程的解	284
附录D	动态射线追踪方程组的推导	287
附录E	关于一阶界面零阶近似情况下的反射和透射系数	292
附录F	关于(3.2.51)式的推导	294
参考文献		300
第四章 VSP 资料的解释和应用		304
§ 4.1	改善地面地震资料的解释	304

1.	识别地面地震记录上的多次波 .....	304
2.	提高地面地震记录的分辨力 .....	306
3.	可靠地识别地震反射层的地质层位 .....	311
4.	查明地面资料得不到良好反射的原因 .....	321
5.	为地面地震资料处理和解释提供比较可靠的参数 .....	321
§ 4.2	研究井孔附近的地层构造细节 .....	323
1.	垂直分辨率 .....	323
2.	水平分辨率 .....	326
3.	利用VSP资料确定井旁小断层 .....	330
4.	利用VSP资料识别礁块下基底灰岩 .....	332
5.	利用VSP资料解释不整合面 .....	332
6.	利用VSP资料求界面的倾角 .....	335
7.	利用VSP资料确定断点离井的距离 .....	338
8.	综合利用直井和斜井的VSP资料查明井旁构造细节 .....	341
§ 4.3	研究井周围的地层岩性变化 .....	343
1.	振幅、反射系数和透射系数 .....	343
2.	衰减 .....	345
3.	层速度 .....	360
4.	速度各向异性 .....	369
5.	P波和S波的联合解释 .....	373
§ 4.4	VSP资料的其它应用 .....	380
1.	钻头前方目的层深度和地层岩性的预测 .....	380
2.	利用井筒波探测地下裂缝和计算S波速度 .....	384
3.	人工裂化带的探测 .....	391
4.	监视二次采油过程 .....	398
	参考文献 .....	399
	结束语 .....	403



# 引 论

## 1. 垂直地震剖面的基本概念

垂直地震剖面 (VSP=Vertical Seismic Profiling) 是一种地震观测方法, 它是与通常地面观测的地震剖面相对应的 (图 1)。地面观测的地震剖面是在地表附近的一些点上激发地震波, 同时在沿地面测线布置的一些检波点上进行观测; 垂直地震剖面也是在地表附近的一些点上激发地震波, 但它是在沿井孔不同深度布置的一些检波点上进行观测。前者检波器放在地表, 测线沿地面布置, 所以又称为水平 (或地面) 地震剖面; 后者检波器放在井中, 测线沿井孔垂向布置, 所以称为垂直地震剖面。在水平地震剖面中, 因为检波器置于地面, 所以除沿地表传播的直达波和面波外, 只能接收到来自地下的上行波; 在垂直地震剖面中, 因为检波器通过井置于地层内部, 所以既能接收到自下而上传播的上行波, 也能接收到自上而下传播的下行波, 这或许是垂直地震剖面与水平地震剖面相比最重要的一个特点。

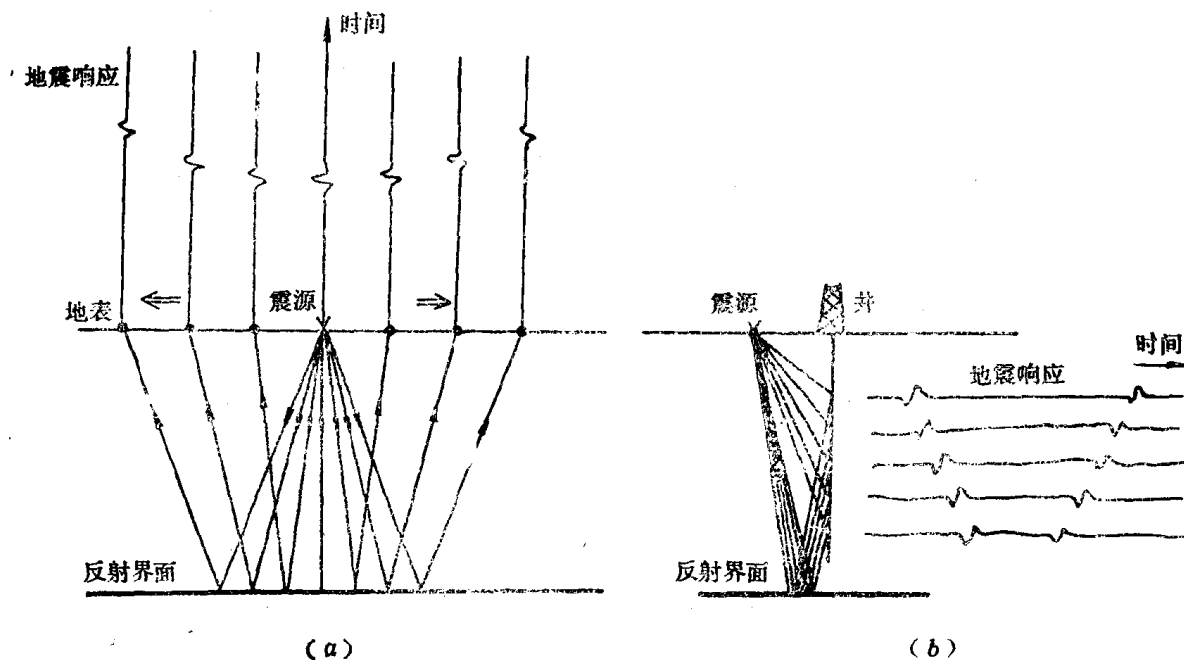


图 1 常规地面观测(a)与 VSP 观测(b)的比较

垂直地震剖面实际上也是一种井中观测方法, 它是早已广泛使用的地震测井 (又称速度检验放炮) 方法的变革和发展。地震测井和垂直地震剖面的不同在于: 前者只利用记录的初至波, 后者不仅利用记录上的初至波, 也要利用记录上的续至波 (图 2); 前者的观测点距 (深度间隔) 通常较大 (100 米到数百米), 后者的观测点距很小 (典型的是 10 到 25 米); 前者只利用震源在井口附近的零偏移距观测系统, 后者还利用震源偏离井口的 (非零) 偏移距观测系统和多偏移距观测系统; 前者的目的主要是测定波速, 后者主要是研究井旁地层剖面及在实际地质介质中研究波的形成和传播的规律。除此之外, 垂直地震剖面在其发展过程

中已经研制了专门的仪器系统，试验了成套的野外工作方法，并发展了解释的理论基础。所以它已远远超出地震测井原来的范围，而发展成为一套完整的、独立的、新的观测方法。

海上和陆上的 VSP 野外布置如图 3。除苏联已经使用多道井下仪器外，目前美国和欧洲所用的井下检波器一般只有一个探头，每次激发时检波器只在一个深度推靠到井壁上，观测一道记录。整口井的观测，需多次重复激发，逐个深度点移动检波器，而后再将这些每次一道的各道记录拼起来，形成一张 VSP 记录。

垂直地震剖面法有一些明显的优点：

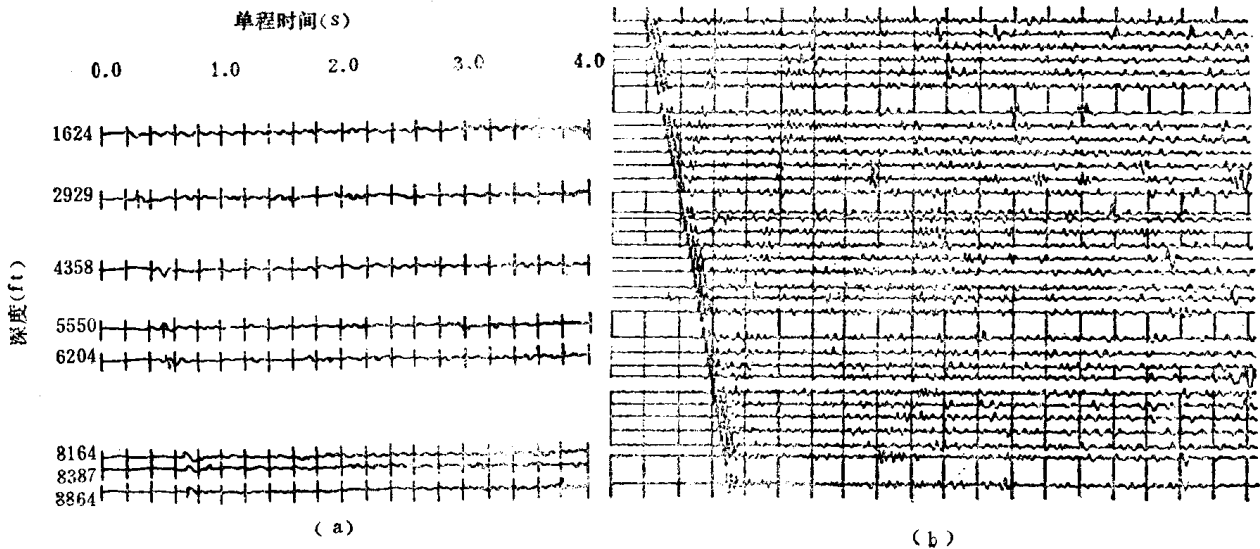


图 2 地震测井记录(a)与 VSP 记录(b)的比较

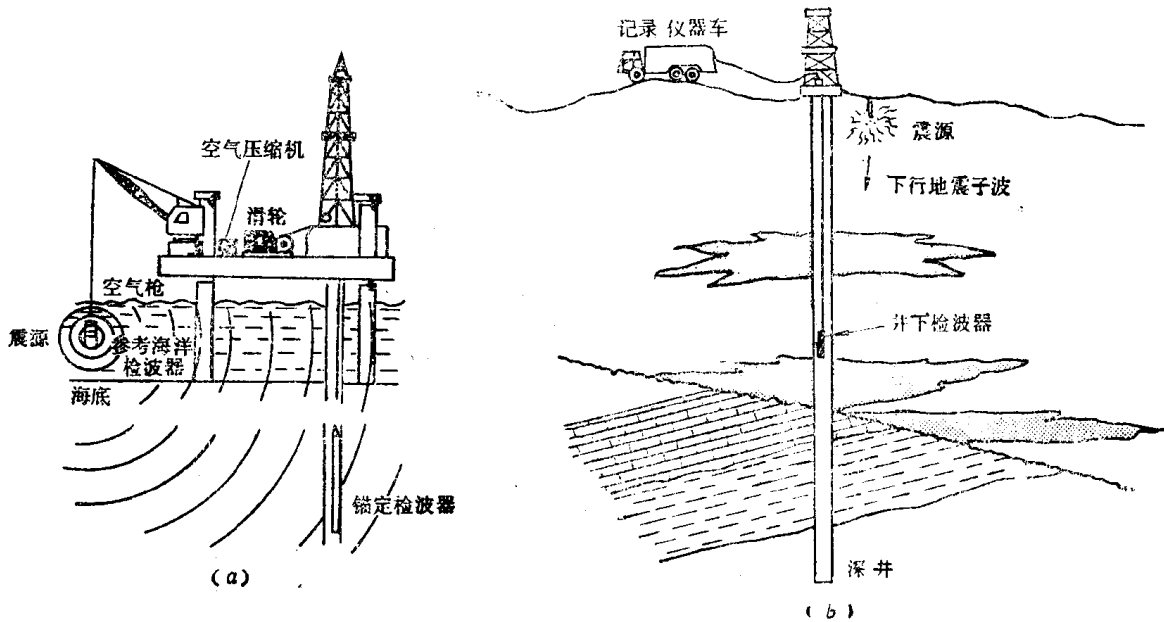


图 3 海上(a)和陆上(b)VSP 的野外布置

(1) 地面剖面基本上是通过观测波场在水平方向(地表)的分布来研究地质剖面的垂向变化,垂直剖面是通过观测波场在垂直方向的分布来研究地质剖面的垂向变化,因此,波的运动学和动力学特征更明显、更直接、更灵敏。

(2) 地表观测离开介质内部有意义的界面较远,与界面有关的波需要经过一段复杂的旅程才到达地表,垂直剖面可以在介质内部紧靠界面附近观测,因而可直接记录到与界面有关的较纯的地震子波的波形。

(3) 地面地震记录上主要的干扰波大都来自剖面上部,由于这些干扰,往往使地面记录上波的识别和对比发生困难。垂直地震剖面由于在介质内部点上直接观测,因而有可能避开和减弱剖面上部低速带的干扰,易于识别波的性质。

(4) 地表观测时,由于剖面上部的影响,地震噪声水平较高,仪器有效灵敏度受到限制,因而很难记录和识别强度低的弱波。垂直剖面在介质内部的点上观测,由于地震噪声水平随深度迅速衰减,因而可以大大提高仪器的有效灵敏度,并使弱波的观测成为可能。

(5) 地表观测时,不同界面的波到达地表测线上各点的方向都是来自下方,且彼此差别不大。垂直剖面观测时,不同界面的波到达井内测线上各点的方向可以是来自上方,也可以是来自下方,而且在界面附近发生突变,所以垂直剖面可以有效地利用波的到达方向这一特点。

(6) 地表观测时,由于低速带和剖面上部的影响,波的质点运动方向发生畸变。垂直剖面由于能避开剖面上部和低速带的干扰,所以能够较准确地观测波的质点运动方向,因而可以利用波的“空间偏振(或极化)”这一特别灵敏的参数来研究波的性质和地层岩性。

VSP 由于有这些“先天性”的优点,所以得到日益广泛的应用,最近几年更是世界范围内地球物理勘探中最活跃的领域之一。利用 VSP 可以深入了解地震子波传播的某些基本特性,帮助了解反射和透射过程,从而反过来又可改善地表地震资料关于构造、地层和岩性的解释。例如,广泛利用 VSP 法确定上行波和下行波,从而识别一次波和多次波,用于估计反射层倾角、识别层间多次波、确定断层面、预测钻头前方的反射层、对比切变波和压缩波、测定切变波和压缩波的速度、确定岩性及烃类对传播子波的影响,估计压缩波到切变波和切变波到压缩波的能量转换等。其中 VSP 对于岩性勘探的应用特别引人注目。

## 2. 历史的回顾与展望

### 1) 基本原理和早期思想的提出

将震源或检波器放在井中进行勘探的基本思想发源于地震勘探的初期,可追溯到本世纪二十年代。*Fessenden* (1917)<sup>[1]</sup>的专利是这方面的第一个文献(图4)。后来,*Barton* (1929)<sup>[2]</sup>曾参考*Fessenden* 早期的工作,介绍井中地震测量的可能应用。*Mc Collum* 和 *LaRue* (1931)<sup>[3]</sup>明确建议,通过测量地表震源到井中地下检波器的旅行时来确定局部地质构造,他们介绍了用深井检波器探测盐丘的办法。这些建议实际上已经包含有垂直地震剖面的基本原理,但是西方地球物理学家并没有把这些井中勘探的思想发展成为 VSP 方法。三十年代末,*Dix* (1939)<sup>[4]</sup>提出利用井中检波器测量时-深曲线和时间-速度关系,导致地震测井(速度检验放炮)技术的发展。这对地表地震资料解释的价值是无法估量的,但是地球物理学家们仍然没有继续前进,将这种具有肯定物理和地质前提的井中地震方法发展为同时观测和利用续至波的垂直地震剖面。

### 2) 形成一种新的观测方法

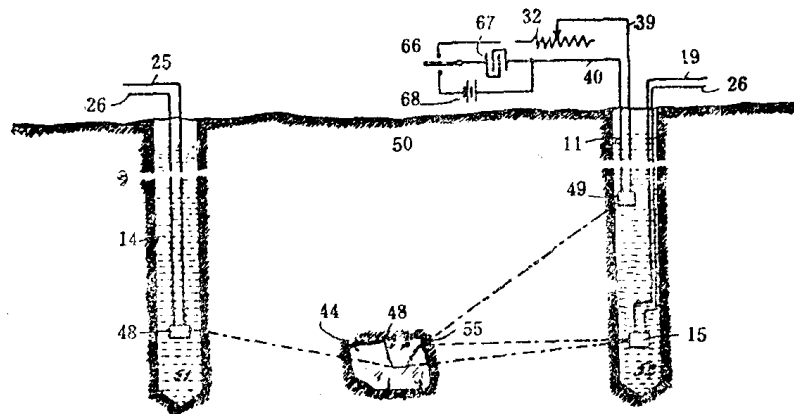


图 4 Fessenden 的专利

五十年代, 除苏联地球物理学家外, 西方 Jolly (1953) [5], Riggs (1955) [6] 以及 Levin 和 Lynn (1958) [7] 的著作, 都曾强调井中地震的潜力, 他们阐明, 如果井中检波器不仅用于记录初至波, 而且研究直达波后面的续至波, 有可能更严格地研究波的传播, 说明一次反射和多次反射之间的相互关系, 研究地震子波的衰减。他们的这些观点实际上就是 VSP 的基本内容。但是西半球对 VSP 仍然没有发生真正的兴趣。与西方不同, 苏联在加尔彼林 [8] 院士的领导和组织下, 从五十年代开始, 经过六十年代到七十年代, 一直进行坚持不懈的努力, 从而研制了 VSP 观测的专门的仪器系统, 试验了成套的野外工作方法, 并发展了相应的解释理论基础, 使 VSP 成为一套完整的、独立的、新的观测方法。1973年, 加尔彼林的专著《垂直地震剖面》就是对苏联十多年试验研究工作的极好描述和总结, 给 VSP 的发展奠定了基础。此后, 加尔彼林和他的同事们仍继续这方面的研究, 主要集中在 VSP 的三分量观测和波的偏振 (1977) [9] 以及 VSP 的广泛应用方面 (1980) [10]。七十年代末, 西方只有少数地球物理学家对 VSP 发生兴趣, 加尔彼林的专著由 SEG 组织译成英文出版 (1974), 这些西方科学家中的几名代表有 Anstey (1977) [11], Balch (1980) [12] [13], Kennett (1973 [14], 1978 [15]), Michon (1976) [16], Omnes, (1978) [17] 等。

### 3) 工艺发展和广泛应用

随着石油勘探进入复杂构造和地层岩性油藏等困难地区, 地震勘探的成本日益增高, 成功率却逐渐下降, 这就迫使各石油公司积极寻求新的技术, 因而他们对 VSP 的兴趣也逐渐增加。正是在各个石油公司的推动下, 从 1979 年到 1982 年, 经过短暂的几年时间, VSP 就迅速在西方全面推广, 并有了进一步的发展。这期间有代表性的是两次技术讨论会和两次继续教育活动。第一次技术讨论会于 1979 年 10 月在俄克拉荷马州的 Bartlesville, 由菲利浦石油公司研究中心举办。第一次继续教育于 1981 年 3 月在新奥尔良, 由东南部地球物理学家协会安排, 近 200 名地球物理学家交流了发展 VSP 方面的经验。第二次技术研讨会于 1981 年 12 月在得克萨斯州的休斯敦, 由地球和行星科学部和麻省理工学院举办。M.N. Toksoz 教授指导了这次研讨会, 会议的论文主要集中于: 三分量 VSP 资料的采集和解释, 特别是用于裂隙的探测, 地震衰减的研究以及压缩波和切变波的联合解释等。第二次继续教育, 1982 年 6 月在 Cannes, 主讲人是地震服务有限公司的 Peter Kennett

和 R.L. Ireson, 其讲稿已整理出版。通过上述有代表性的几次技术活动和其它一些技术会议, VSP 各个方面的研究成果逐年迅猛增加。这些成果主要不是表现在 VSP 的理论方面, 而是表现在发展 VSP 的工艺方面, 尤其是计算机资料处理和野外资料采集, 以及 VSP 的广泛应用, 特别是复杂构造和地层岩性勘探方面。除菲利浦石油公司外, 美国地质调查局、SSC 公司、CGG 公司、ARCO 公司、Schlumberger 测井公司, 以及几乎所有大石油公司现在都竞相利用 VSP 技术。Hardage(1984)<sup>[18]</sup> 所著的《垂直地震剖面 部分 A: 原理》在某种程度上也是西方最近数年在工艺和应用方面发展的总结。

我国自从 1978 年从西方间接见到关于加尔彼林专著《垂直地震剖面》的英译本之后, 石油工业界立即组织力量进行翻译, 并在《石油地球物理勘探》(1980 增 2) 杂志上系统介绍。最近几年, 随着每年 SEG 年会上 VSP 论文数目的增加, 国内对此项新技术的重视也逐年增长, 一方面引进推广, 一方面自力更生试验, 形成热潮。1984 年, 继南海和中原油田试验之后, 胜利、江苏、大港、辽河、新疆等油田都先后在各自的一些井上作了试验性测量, 取得了部分效果。目前, 我国和西方一样, VSP 也是地球物理勘探中最活跃的领域之一。

回顾世界范围内 VSP 发展的历史, 人们自然会问, 为什么在苏联能坚持研究并首先取得成功? 为什么该法在西方能如此快速的推广和发展? 笔者认为, 前者是与苏联的科学体制有关的, 后者是与目前石油地震勘探面临的形势和西方的整个工业基础有关的。

#### 4) 趋势

VSP 还在继续向前发展, 其主要方面可能是: 仪器设备将进一步改善; 在复杂构造和岩性勘探及其它一些未知领域中将进一步发挥作用; VSP 与地面地震和声测井等其它勘探方法将更好地结合并成为这种结合的纽带; VSP 作为自然环境下地震波实验研究的手段将会不断的有所发现。

### 参 考 文 献

- [1] Fessenden, R.A., 1917, Method and apparatus for locating ore bodies; U.S. Patent No. 1,240,328.
- [2] Barton, D.C., 1929, The seismic method of mapping geologic structure; Geophy. Prosp., V.1, p.572-624.
- [3] McCollum, B. and Larue, W.W., 1931, Utilization of existing wells in Seismograph work; Early Geophysical Papers, V.1, p. 119-127.
- [4] Dix, C.H., 1939, The interpretation of well-shot data (part I); Geophysics, V.4, p.24-32.
- [5] Jolly, R.N., 1953, Deep-hole geophone study in Garvin Country, Oklahoma; Geophysics, V.18, p.662-670.
- [6] Riggs, E.D., 1955, Seismic wave types in a borehole; Geophysics, V.20, p.53-67.
- [7] Levin, F.K. and Lynn, K.D., 1958, Deep hole geophone studies; Geophysics, V.23, p.639-664.
- [8] Gal'perin, E.I., 1974, Vertical Seismic profiling; Society of Exploration

Geophysicists special Publication No.12, Tulsa, 270 pages.

- [9] Gal'perin, E.I., 1977, Polarization method of seismic investigations; Moscow, Nedra.
- [10] Gal'perin, E.I., 1980, Vertical seismic profiles at the exploration and exploitation stage; Akad Nauk. SSSR Dokl., V. 253, No. 6
- [11] Anstey, N.A., 1980, Seismic delineation of oil and gas reservoirs using borehole geophones; Gr. Brit. Patents 1,569,581 and 1,569,582. Canadian patents 287,178 and 375,890-7.
- [12] Balch, A.H., Lee, M.W., Miller, J.J., and Ryder, R.T., 1980 a, The use of vertical seismic profiles and surface seismic Profiles to investigate the distribution of aquifers in the Madison Group and Red River Formation, Powder River Basin, Wyoming-Montana; Preprint SPE 9312, 55th Annual Fall Tech. Conf. and Exhib. of the Soc. of Petrol. Eng. of AIME, Dallas.
- [13] Balch, A.H., Lee, M.W., and Miller, D.C., 1980b, A vertical seismic profiling experiment to determine depth and dip of the Paleozoic surface at drill hole U10bd, Nevada test site, Nevada; USGS Open-File Report 80-847.
- [14] Kennett, P. and Ireson, R.L., 1973, Some techniques for the analysis of well geophone signals as an aid to the identification of hydrocarbon indicators in seismic processing; Paper presented at the 43rd Annual International Meeting of SEG.
- [15] Kennett, P. and Ireson, R.L., 1977, Vertical seismic profiling—recent advances in techniques for data acquisition, processing and interpretation; Paper presented at the 47th Annual International Meeting of SEG.
- [16] Michon, D., 1976, Vertical seismic profiling; Paper presented at the 46th Annual International Meeting of SEG.
- [17] Omnes, G., 1978a, Vertical seismic profiles—a bridge between velocity logs and surface seismograms; Paper No. 53, 53rd Annual Conf. and Exhib. of Soc. of Petrol. Eng. of AIME, Houston.
- [18] Hardage, B.A., 1984, Vertical Seismic Profiling Part A; principles.

# 第一章 VSP的野外资料采集

## §1.1 地震波的激发——震源

### 1. VSP 震源选择的一般原则

1) VSP 所用的震源最好与 VSP 井旁地面地震剖面所用的震源一致

VSP 资料的应用之一就是帮助地面地震资料的解释。当两者所用震源一致时，同样的震源子波表现出的反射特征也一样，这就容易实现地表资料和 VSP 资料的统一解释。当然，很多情况下，VSP 的震源不可能与地表地震剖面所用震源一致，这时只有通过资料处理，例如子波互等化反褶积等使两者子波等价。

2) VSP 各次激发的震源子波应具有高度的一致性和重复性

如前所述，目前除苏联外，每次激发井下检波器只在一个深度点上记录，因此，为了以较小的深度间隔在整个井或一段井上进行观测，就需要在地表同一位置激发数十到数百次。这些多次激发，先后在各个深度观测，最后拼成的 VSP 地震记录，只有当震源子波互相一致时才便于对比。图 1.1 示意地给出子波重复性好和重复性不好两种不同震源子波的情况。即使今后采用多道井下仪器，因为道数有限，这一原则也仍然需要遵循。

3) VSP 震源的输出强度应该适中

在记录地表地震资料时，很多地球物理学家已经发现，“震源输出越强越好”的观点并不正确，垂直地震剖面中更是这样。图 1.2 示意表明，垂直地震剖面的下行波通常比上行波强得多。但是 VSP 资料的大部分应用都涉及到对这些上行波的分析解释。除此之外，随着震源强度增加，浅部交混回响也明显增强，因而引起下行波的数目增多和振幅增强，上行波被这些下行波“淹没”所带来的坏处或许比上行波本身能量增强的影响更大，因此应该选择强度适中的震源为宜。

4) 激发频谱应尽可能宽，以便提高分辨率

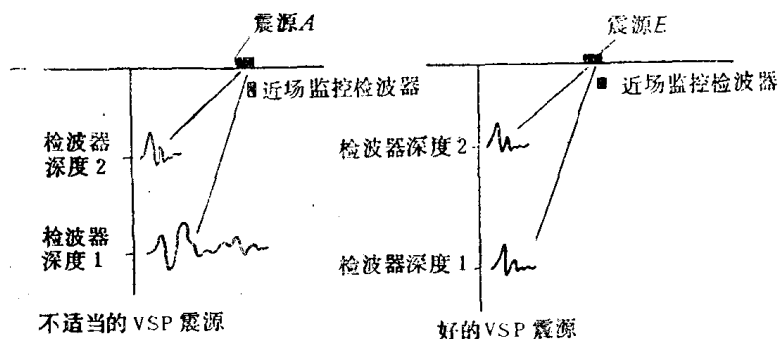


图 1.1 震源子波重复性的说明〔7〕

除此之外，激发的干扰波能量应该相对较小或者易于压制，激发的波型（例如压缩波或切变波）应该与勘探的目的相一致等等也都是选择震源时应该考虑的原则。

下面分别讨论垂直地震剖面所用的各种震源。

## 2. 炸药震源

苏联 60~70 年代作 VSP 时一般采用炸药震源, 西方开始阶段也曾试验炸药震源, 例如 Levin 和 Lynn (1958) [1], Wuenschel (1972, 1976) [2] [3], Lash (1980, 1982) [4] [5] 以及 Balch (1982) [6] 等, 但现在炸药震源使用较少, 海上则完全不用炸药震源。

炸药震源的优点是: 单次激发能量较强, 可得到较高的体波输出振幅, 频谱较宽, 高频成分比较丰富, 分辨率高。缺点是: 震源子波的重复性难以保证, 多次激发的多道记录不好对比; 野外操作比较复杂, 费用大, 不安全。

为了改善震源子波的重复性, 苏联的办法主要是仔细地选择激发岩性和合适的炸药量, 西方除考虑激发岩性和炸药量外, 还考虑井径, 即希望炮井在多次激发过程中井深和井径都保持不变。Hardage 曾给出一张图 (图 1.3), 示意说明这些激发条件的选择: (1) 井深  $H$  较大, 通常 12~15 米, 钻到风化层之下, 药包高度  $h$  约 3 米; (2) 井径  $D$  足够大, 直径约 1 米左右, 这种大井径的炮井要用专门的钻机打钻; (3) 炮井内下套管和浇灌水泥, 套管直径一般为 30 英寸<sup>①</sup>或 36 英寸, 水泥要返到地面, 套管中要灌满水; (4) 炸药量尽可能小, 通常为 0.5~1 公斤, 也可通过试验确定最佳药量。

为了说明井径、激发岩性、炸药种类和允许的重复放炮次数 (套管破裂之前允许放炮的

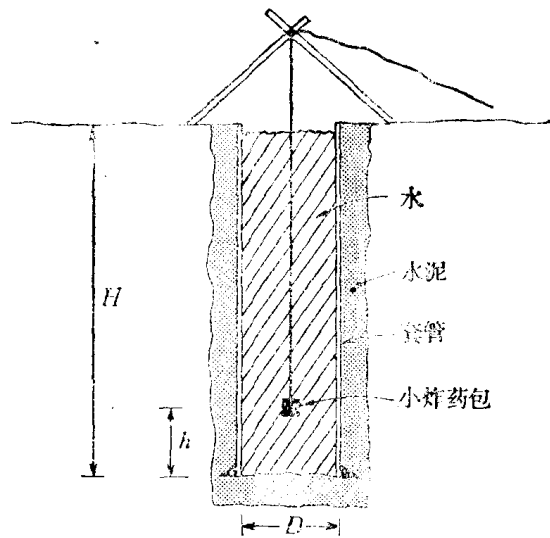


图 1.3 VSP 炸药震源井的设计 [7]

① 1 英寸 = 25.4 毫米。

② 1 英尺 = 0.3048 米。

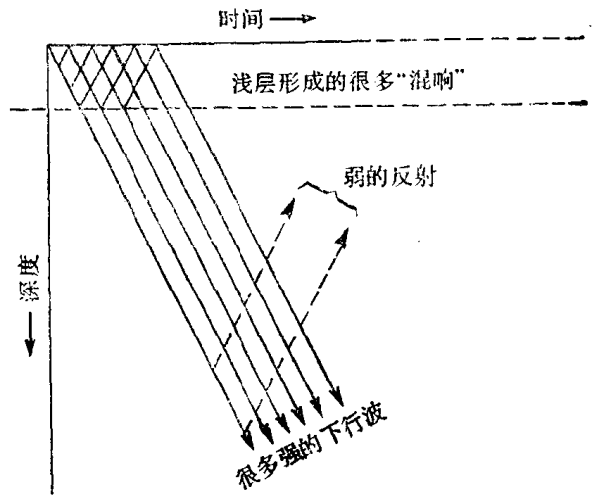


图 1.2 下行波能量和上行波能量的比较 [7]

次数) 之间的关系, Wuenschel 曾作过试验 [2] [3], 结果如图 1.4 所示。由图可见, 对于坚硬的岩石, 允许放炮的次数相对增加, 井径允许减小。

Radler (1981) 专门设计了一种用于炸药震源的 Y 型管装置 (图 1.5), 它是由直钻杆上安一个斜管构成。炸药从斜管下到 Y 型管的顶部, 而后将水 (或钻井用流体) 泵入管内, 推动炸药下到井底, 再将钻杆提起几英尺<sup>②</sup>, 炸药仍留在井底, 并点火爆炸。激发之后, 点火线通过 Y 型管收回, 再装入新的药包, 重复上述过程。这种方法的好处是: 快速高效; 振幅均匀; 震源波形一致。振幅均匀和波形一致的部分原因是由于每次放炮以后炮井完全被冲洗之故。



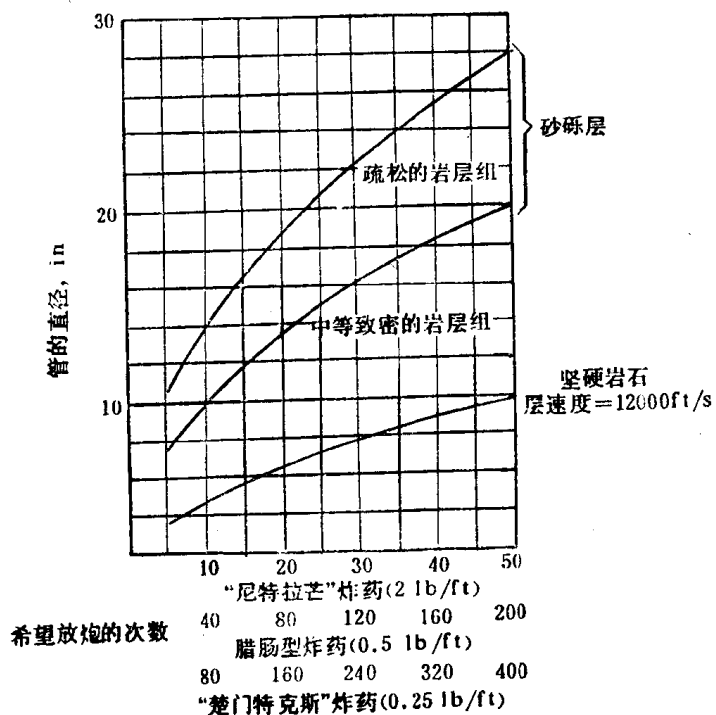


图 1.4 井径、激发岩性、炸药种类和允许的重复放炮次数之间的关系 [2][8]

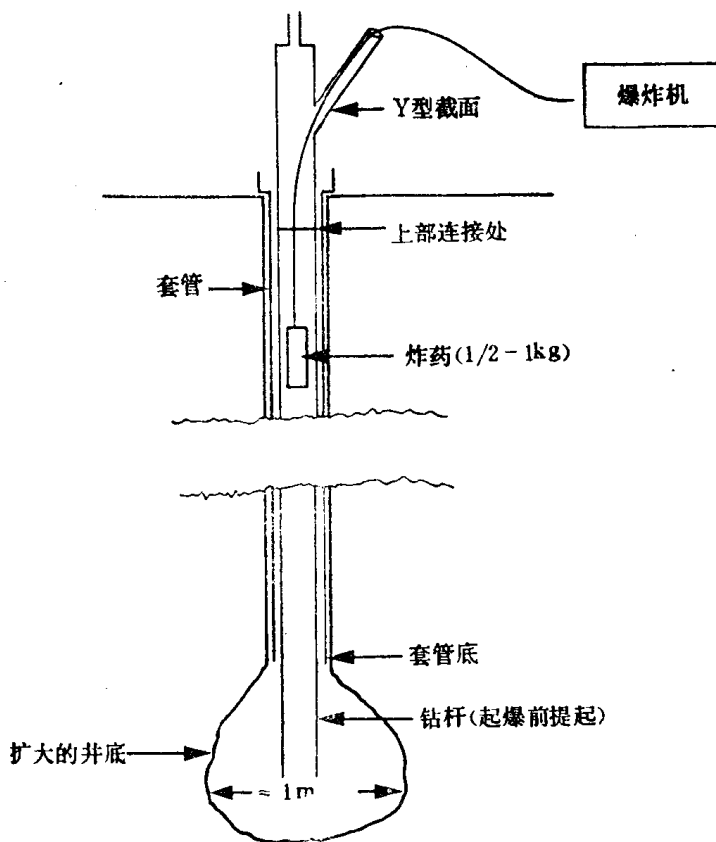


图 1.5 专门设计的用于炸药震源激发的 Y 型管