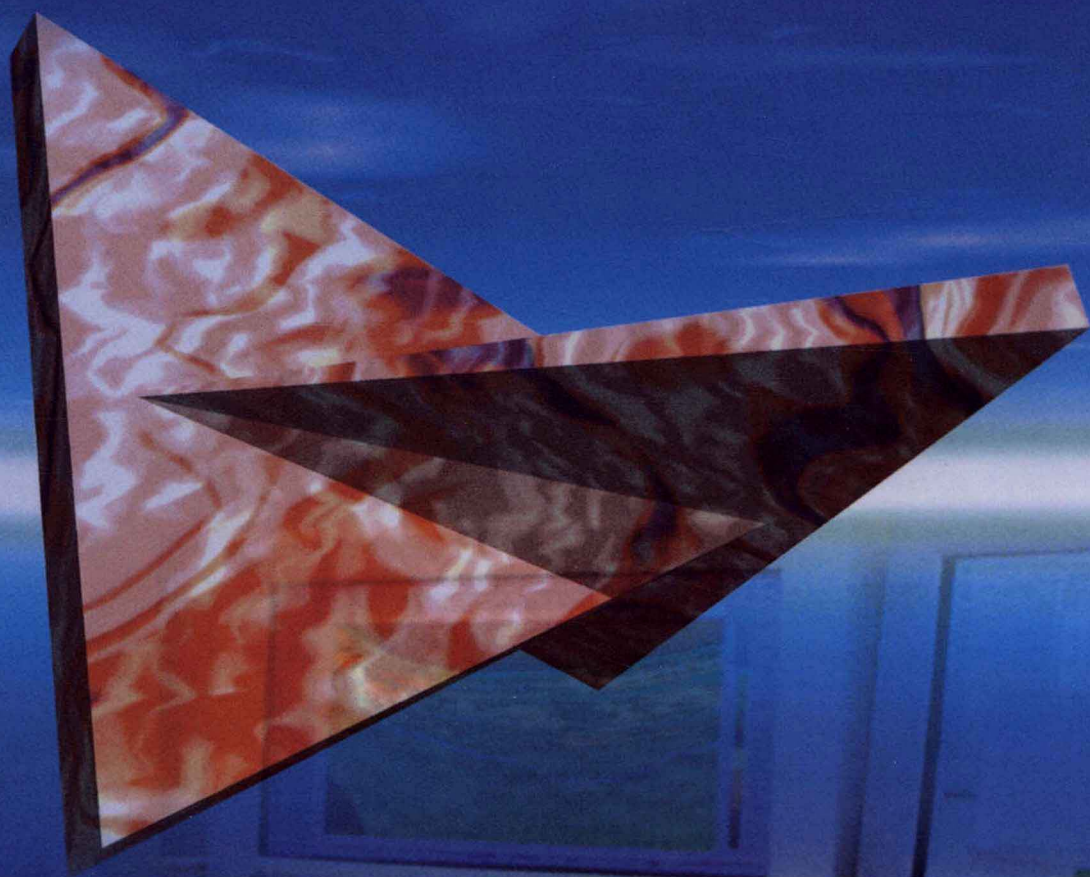


三维VSP 地震勘探技术

宋玉龙 著



石油工业出版社

三维 VSP 地震勘探技术

宋玉龙 著

石油工业出版社

内 容 提 要

该书概述了三维 VSP 技术的发展现状及技术概况,从三维 VSP 的波场特征入手,研究了三维 VSP 观测系统设计中的相关问题。并以常规 VSP 处理流程为基础,针对三维 VSP 的特点,深入研究了波场分离、速度分析、成像等关键环节,形成了相应的资料处理方法和技術。

该书可供从事地球物理勘探研究工作人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

三维 VSP 地震勘探技术/宋玉龙著.

北京:石油工业出版社,2005.8

ISBN 7-5021-5164-8

I. 三…

II. 宋…

III. 地震勘探-应用软件, 三维 VSP

IV. P631.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 087049 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2005 年 8 月第 1 版 2006 年 12 月第 2 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 7

字数: 135 千字 印数: 1001—2000 册

书号: ISBN 7-5021-5164-8/TE·3994

定价: 30.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

20 世纪 80 年代以来,随着勘探程度的提高,我国陆上油气资源的勘探目标已从大型整装构造油藏转向中小型复杂隐蔽型油藏,勘探难度越来越大。特别是对于一些地质特征比较复杂、储量品位比较差的地区,由于勘探阶段资料少,认识程度差,储层预测的精度已远远不能满足编制开发方案的需要。另一方面,目前大部分主要油田已相继进入开发中后期,老油田进入高水油比及产量递减开采阶段,采油成本不断上升,开发效果逐渐变差,开采对象日益复杂,开发难度不断加大。随着开采程度的加深,老油田增产挖潜的对象不再是层间或小层间的潜力层,而是层内的潜力段和井间剩余油分布相对集中的零散块,新储量具有“低、深、稠、贫、散”的特点,油气田管理和开采过程面临着愈来愈复杂的地质情况。总的来说,油气藏开发对地震储层预测技术主要提出了 3 个迫切需要解决的问题:①微构造及微地质界面识别及横向预测精度低、效果差,无法满足陆相沉积复杂油藏精细描述和进一步提高采收率的要求;②储层物性横向预测精度低、可靠性差;③多学科协同攻关及多种资料综合应用的能力差。虽然我们已经明确了地质、地震、测井、油藏、数值模拟及计算机多学科协同攻关的优势和必要性,但长期形成的单学科独立作战的习惯和观念仍难以转变。

三维地震资料具有覆盖面广、横向采集密度大的特点,有利于研究储层属性的横向分布。然而,三维地震资料面临的主要难题是垂向分辨率低。对我国普遍存在的陆相储层(以“米级”规模薄层间互的砂泥岩)来说,单纯依靠常规的三维地震很难分辨至单砂体规模,而且预测的储层参数(如孔隙度、流体饱和度)的精度较低,难以满足目前勘探开发的需要。

井中地球物理技术(包括测井、VSP 和井间地震等)的发展为高精度储层参数预测提供了有效的手段。VSP 具有优越的激发与接收条件,避开了地表低速带对地震信号高频成分的吸收,具有较高的分辨地层的能力。特别是在复杂构造或复杂介质地区,VSP 技术能有效地了解井孔附近的地质结构、岩石物性等特征。尤其在油田开发过程中,通过 VSP 成像结合地面三维地震资料和岩性资料,能进行精细的地震属性分析,可以进一步核实关键层位,搞清岩层之间的接触关系,建立起精确的地质模型,进行地层的非均质性研究,为开发方案的调整提供技术支持。因此无论在勘探领域,还是在开发领域,VSP 技术的作用都是非常重要的。

近几年来，三维 VSP 技术已经成为油藏地球物理研究的热点之一，其在油藏精细描述和油藏动态检测等方面初见成效。本书总结了作者多年来从事三维 VSP 方法研究和应用的主要成果和体会，希望相关地球物理工作者能够从中得到借鉴。

由于作者本人数学和地球物理专业知识所限，书中一定存在许多不妥之处，敬请专家和同行批评指正。

Preface

With the improvement of exploration degree since 1980s, the exploration target for onshore hydrocarbon resources in China has already been changed from huge conventional structure oil reservoirs to small-medium subtle oil reservoirs, the exploration is much more difficult than before. Especially in some areas that the geologic character is more complex and reserves grade is relatively low, precision of reservoir forecasting is far lagged of the requirement of designing the development plan due to the data shortage in exploration period and the inadequate cognition. On the other hand, at the present time, the most of major oilfields have come into the middle or later development period one after another, the mature oilfields entered into high water-oil ratio and production declining period, the oil recovery cost raises constantly, the exploiting effect gets worse gradually, target horizons becomes complex increasingly to be difficult for exploitation. With the exploitation deepening, the target of yield increase and digging potentiality in mature oilfields is not the potential layers between strata series or minor strata, rather than potential parts in strata and the scattered blocks where oil remaining relatively-centralized distribution between different wells, new reserves were characterized by low, deep, thick, lean and dispersing, the management of oil and gas fields and exploitation process faced with more and more complicated geological circumstances. In general, three questions that need to be solved urgently for seismic reserves forecasting technique were put forward by hydrocarbon resources development: firstly, the identification of microstructure and micro-geologic-interface are not precise enough and the lateral predication precision is low, can't meet the requirement of accurate description of continental complex oil reservoirs and increasing recovery efficiency further. Secondly, the lateral forecasting precision of reservoir physical characteristics is low and undependable. Thirdly, the corporation work capability from multi-disciplines and the comprehensive application capability for multiform data are low. Although the advantage and necessity of the corporation work between multi-disciplines studies such as geology, seismic exploration, well logging, reservoir, numerical modeling and computer were definite, the conception and behavior habit formed for long-term

with single discipline study might be not changed easily.

3D seismic data has the features including wide coverage and high lateral acquisition density, which are favorable to reveal the reservoir characteristics' lateral distribution. However, low vertical distinguishing capability is the main problem that 3D data was faced with. For ubiquitous continental reservoirs in China (thin sand-shale layer scaled by meter), the dimensions of single sand body can't be distinguished only by 3D seismic data, furthermore, the forecasting precision of reservoir parameters (porosity, liquid saturation) is too low to meet the requirement of actual exploration and development.

The development of geophysical technique, including well logging, VSP, cross-well seismic, in well becomes the effective methods for high-precision reservoir forecasting. VSP has excellent energizing and receive condition, avoiding the high frequency in seismic signal to be absorbed by low-velocity layer near surface and has the high capacity for distinguishing layer. Especially in complex structure or complex medium area, VSP technique can effectively know the characters of geological structure and rock's physical character, especially in the development process of oilfield, through the combining VSP imaging with 3D seismic data and lithologic data, it is used to analyze accurately the seismic property, in order to verify the key layers, understand clearly the contacted relationship between rock layers, set up the accurate geological model, serve with the technical support for development plan's adjustment. Hereby, no matter in exploration or in development fields, the VSP plays a very important role.

In recent years, 3D VSP technique has already become one of the hotspots in oil reservoir geophysical research, now it comes into effect in precision description and dynamic detection of oil reservoir. This book is the collection of major achievements and experience, made by author in studying on 3D VSP method and its application for many years, which can be used as reference for related people working in geophysical field.

Due to a limited level on mathematics and geophysical knowledge, there might be some errors in this book, the author are willing to listen the criticism and correction of experts and colleagues.

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 三维 VSP 技术研究的目的和意义	(1)
第二节 VSP 的发展历史	(2)
第三节 三维 VSP 技术国内外发展现状	(5)
第四节 三维 VSP 技术实用性研究	(7)
第五节 三维 VSP 研究内容与创新点	(7)
第二章 VSP 技术概况	(10)
第一节 VSP 仪器装备	(10)
一、震源的选取原则	(10)
二、震源的种类及优缺点	(11)
三、井下检波器	(12)
第二节 VSP 采集技术	(12)
第三节 VSP 资料干扰波分析	(12)
一、井筒波	(13)
二、井下检波器与地层耦合不良引起的噪声	(13)
三、其他噪声	(13)
第四节 VSP 资料处理	(13)
一、零井源距 VSP 资料处理基本思路	(13)
二、非零井源距 VSP 资料处理	(15)
第五节 VSP 资料的解释和应用	(19)
第三章 三维 VSP 观测系统的设计	(21)
第一节 三维 VSP 观测系统设计的一般步骤	(21)
第二节 三维 VSP 观测方式	(22)
一、线性观测系统	(22)
二、三维 VSP 环形观测系统 (常井源距 VSP)	(22)
三、三维 VSP 放射状观测系统	(23)
四、三维斜井 VSP 观测系统	(24)
第三节 三维 VSP 观测系统相关参数论证分析	(25)
一、成像区	(25)
二、拉伸率剖面制作与分析	(25)

三、入射角剖面制作与分析	(26)
四、覆盖次数剖面	(26)
第四节 实例分析	(26)
第四章 三维 VSP 采集的野外试验	(32)
第一节 表层调查	(32)
一、表层调查的目的	(32)
二、表层调查的方法	(32)
三、双井微测井的施工因素选择	(33)
第二节 采集仪器因素	(34)
一、时间采样率	(35)
二、前置低截频滤波	(35)
三、前置固定增益	(36)
第三节 接收仪器因素	(38)
第四节 震源的选择	(39)
一、地震波的激发	(39)
二、炸药震源激发深度与岩性	(39)
三、炸药震源激发方式	(40)
四、炸药震源激发药量	(42)
五、可控震源激发因素的选择	(43)
第五节 试验资料的分析	(44)
一、频率(主频、有效频带)分析	(45)
二、能量分析	(45)
三、信噪比分析	(46)
四、借鉴经验分析资料	(46)
第五章 VSP 资料波场分离技术	(47)
第一节 常规分离技术	(47)
一、 τ - p 域滤波	(47)
二、F-K 滤波	(48)
三、中值滤波	(48)
第二节 基于模型波场分离技术	(49)
一、下行波与上行波的分离	(49)
二、纵波与横波的分离	(50)
三、模型试验	(51)
第三节 最优中值滤波	(54)
第六章 三维 VSP 旅行时反演	(57)

第一节 基本理论	(57)
第二节 横波速度反演	(58)
一、方法原理	(58)
二、反演步骤	(59)
第三节 VSP 横波速度反演模型测试	(59)
一、不同初值对横波速度反演结果的影响	(59)
二、转换波旅行时拾取误差对横波速度反演结果的影响	(60)
三、纵波速度计算误差对横波速度反演的影响	(63)
第四节 VSP 横波速度反演实际资料测试	(69)
一、纵、横波速度对比分析	(69)
二、反演结果对比分析	(71)
第五节 横波速度反演应用前景	(73)
第七章 三维 VSP 波动方程深度偏移成像	(75)
第一节 波场外推	(75)
第二节 有限差分法的误差补偿	(77)
第三节 波场成像条件	(79)
第四节 VSP 数据成像	(79)
第五节 模型分析	(80)
第八章 三维 VSP 资料处理实例分析	(82)
第一节 实例一	(82)
一、野外资料采集概况	(82)
二、原始资料分析	(82)
三、初至拾取与速度分析	(82)
四、三分量 VSP 资料合成与波场分离	(84)
五、反褶积试验	(85)
六、VSP—CDP 成像	(86)
第二节 实例二	(90)
一、工区概况	(90)
二、处理流程	(90)
三、预处理	(91)
四、深度偏移成像	(93)
第九章 结论与展望	(95)
第一节 结论	(95)
第二节 三维 VSP 技术研究展望	(96)
参考文献	(97)

第一章 绪 论

第一节 三维 VSP 技术研究的目的和意义

VSP 是 Vertical Seismic Profile 的缩写，中文常称为垂直地震剖面法。它与地面观测的水平地震剖面相对应。地面地震通常是将震源和检波器都置于地面进行采集；而 VSP 技术是将震源和检波器其中的一种置于井下进行的地震采集。根据震源和检波器的位置，VSP 采集方式通常有两种：一种是将检波器置于井中，而震源置于地面的采集方式；另一种则是将震源置于井中，将检波器置于地面的观测方式。前者就是通常所谓的 VSP 技术，后者一般成为逆 VSP 技术，本书如不特别指出，都是指第一种观测方式（如图 1-1）。

VSP 与地面地震相比有一个很大的不同在于，地面地震是将震源和检波器都置于地面，所以除了接收沿地表传播的直达波和面波外，只能接收到来自于地下界面的上行波；而 VSP 技术因为检波器置于地层内部，所以既能接收到上行波，又能接收到下行波（如图 1-1）。

VSP 技术也是一种井中地震技术，它直接来源于地震速度测井（Check Shots），是地震速度测井方法的变革和发展，R. J. Brewer 称“VSP is a Check Shot Step Up”。地震速度测井主要是利用记录上的初至波来测定地震波速，一般采用震源在井口附近的零井源距观测系统，并且观测点距也较大（一百至数百米）；VSP 技术不仅利用了记录上的初至波，还利用了记录上的续至波，用来研究实际地层介质中地震波的形成与传播机制，观测点距一般较小（典型的为 10~25m，甚至 5m 或更小）。而且

VSP 技术在发展过程中逐渐形成了专门的仪器设备、成套的野外工作方法和处理解释的理论基础。可以说 VSP 技术现在已经成为一套完整的、独立的、新的观测方法。

与地面地震相比，VSP 技术具有很多优点，这些优点大都来自于其检波器

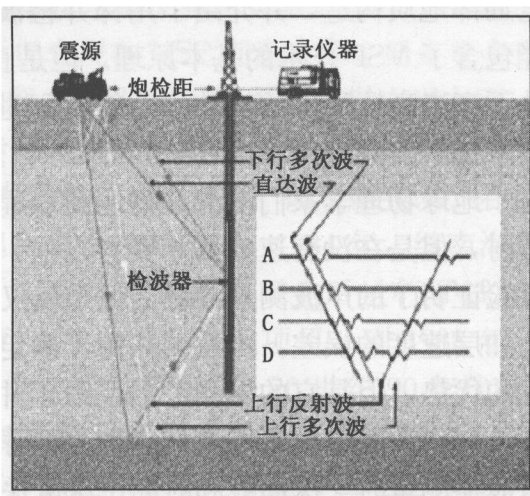


图 1-1 VSP 的观测方式

置于井中的观测方式。这种方式使得 VSP 检波器在地层界面附近可以接收到与界面有关的地震信息；并且避开了一次表层低速带强烈的吸收作用；避开了来自于地表附近的强烈的干扰；可以接收到上行波和下行波。

在复杂构造或复杂介质地区，VSP 技术能使我们有效地了解井孔附近的地质结构、岩石物性等特征，尤其在油田开发过程中，通过 VSP 成像结合地面三维地震资料和岩性资料，进行精细的地震属性分析，可以进一步核实关键层位，搞清岩层之间的接触关系，建立起精确的地质模型，进行地层的非均质性研究，为开发方案的调整提供技术支持。因此无论在勘探领域，还是在开发领域，VSP 技术的作用都是非常重要的。

VSP 这些优势使其应用日益广泛，随着仪器设备的发展，VSP 技术在沉寂几年后，最近几年又成为研究的热点之一。

第二节 VSP 的发展历史

将检波器置于井中来获得地层速度的想法并不是一个较新的概念 (R. J. Brewer, 2000)。早在 1917 年，Fessenden 就提出了一个这方面的专利技术。后来 Barton 在 1929 年介绍了井中地震测量的可能应用。Mc Collum 和 LaRue (1931) 明确建议，可以通过测量地表震源到井中检波器的旅行时来确定局部地质构造，并介绍了用深井检波器探测盐丘的方法，这个方法实际上已经包含了 VSP 技术的基本原理。但是直到 20 世纪 30 年代，第一个可以适用于井下高温高压环境的检波器才得以问世，自此，地球物理学家们才开始将该项技术投入实际应用 (D. Ristow, 1994)。

地球物理学家们都清楚将地震双程反射时转换到深度要用到声波的单程旅行时，但是在没有速度测井资料以前，精确速度信息的获得有时需要使用经过试验证明了的声波测井曲线。但是仅仅依靠声波测井曲线需要承担很大的风险，比如层速度的误差。声波测井用于确定地层界面和间接孔隙度测量方面具有很大的优势，但是它的探测范围仅限于井口周围很小的距离，并且受到井况的限制。因而地震速度测井受到地球物理学家的重视。1939 年，Dix 提出利用井中检波器测量时—深曲线和时间—深度关系，这直接导致了地震测井技术的发展。该技术对地面地震资料的处理和解释具有十分巨大的价值，但是地球物理学家们没有继续前进，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 VSP 技术。

20 世纪 50 年代，许多西方地球物理学家（如 Jolly, 1953；Riggs, 1955；Lennin 和 Lynn, 1958）都曾强调井中地震的潜力。他们认为，如果井中检波器不仅用于记录初至波，而且用来研究直达波后面的续至波，有可能可以更严格

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。这些观点实际上就是 VSP 的基本研究内容,但是西方对 VSP 技术并没有发生真正的兴趣。

与西方国家不同,前苏联在加尔比林(E. I. Gal'perin)院士的领导和组织下,从 20 世纪 50 年代开始,直到 70 年代,一直为将 VSP 技术发展成一套完整的、独立的、新的观测方法做不懈的努力。1971 年,加尔比林的专著《垂直地震剖面》正式出版,它是对前苏联 20 年工作经验、研究工作的总结,该书为后来 VSP 技术的发展奠定了坚实的基础,至此 VSP 技术正式形成,并且进入实用化阶段。70 年代末,西方只有少数专家对 VSP 有兴趣,加尔比林的专著由 SEG 组织翻译成了英文版(《Vertical Seismic Profiling》)于 1974 年出版,这些对 VSP 技术有兴趣的专家主要有:Anstey (1977),Balch (1980),Kennett (1973, 1978),Michon (1976) 和 Omnes (1978) 等。

VSP 技术在西方的全面推广主要是在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初这几年的时间里完成的。主要原因在于随着勘探对象的日益复杂、地震勘探成本的增高和勘探成功率的降低,各大石油公司意识到必须寻找新的技术来突破这些障碍,因而他们对 VSP 的兴趣逐渐增加,在石油公司的推动下,VSP 技术受到各大地球物理公司的重视,并进行了广泛的研究。经过 1979 年到 1982 年这短暂的几年时间,VSP 技术迅速在西方全面推广,并有了进一步发展。80 年代中期和末期,VSP 的研究和试验在西方先进科学技术的支撑下,获得了突飞猛进的发展,硕果累累。VSP 技术的研究成果不仅表现在 VSP 理论方面,而是更多地表现在了工艺方面,尤其是资料处理与解释,以及 VSP 资料的深度应用方面。

自 20 世纪 80 年代初,加尔比林的专著《垂直地震剖面》的英译本进入我国,从 80 年代中期开始,我国开始大规模研究、发展和推广该项新技术。在引进和普及这项技术过程中,朱光明教授起到了很大的作用。1984 年,继南海和中原油田试验之后,胜利、江苏、大港、辽河、新疆等油田先后进行了试验。1985 年,原石油工业部将该项技术研究列为“七五”攻关项目,到 1988 年和 1989 年,全国主要油田已将 VSP 测井列为正式生产任务。20 世纪 90 年代初,中国的 VSP 技术曾出现过一个小高潮,各探区 VSP 测井数量也迅速上升。

经过 20 世纪 80—90 年代的发展,零井源距和非零井源距 VSP 已经形成了采集、处理、解释的工业化作业流程与规范。采集方法也逐步完善,从零井源距和非零井源距 VSP 发展到变井源距(Walk away) VSP、环形 VSP(Walk around)、逆 VSP(RVSP)、随钻 VSP(SWD)、三维 VSP 等多种方式。1986 年 AGIP (Stewart, 1998) 公司采集了全球第一块三维 VSP 资料。

但是,随着 VSP 技术研究和应用的不断深入,人们发现:VSP 在解决复杂地质任务和进行油气预测方面的能力有限;VSP—CDP 成像资料在可靠性上与

三维地震资料的偏移成像成果相比，差距明显。这些问题归根结底是井下接收系统造成的：早期的井下检波器一般是单级单分量（或三分量）或者是多级单分量，即使是多级检波器也往往不能达到期望的级数，并且性能有限，比如接收频率低、采样率受限制等。

影响 VSP 技术的应用和发展的主要技术是采集技术，而采集技术的发展则受到了井下仪器设备的制约。因此，可以说井下地震信号接收系统的研究一直伴随和影响 VSP 技术的发展。认识到井下地震信号接收系统的限制，到 20 世纪 90 年代初期，VSP 采集工作进入一个短暂的低潮期，井下接收系统的研究受到了人们的重视。早期的 VSP 采集一般使用单级单分量或者单级多分量模拟检波器，后来发展为多级单分量模拟检波器。早期的多级检波器可以分为不需推靠的压电型（Harris, 1992）和需要推靠的三分量检波器（Kawahara, 1990），其中压电检波器尽管具有不需推靠、施工方便、接收频率高等优点，但是它同时具有缺少矢量接收能力、易受管波及其他流体相关噪音的影响等缺点（Krohn, 1992），因而一直未受到重用。同时，早期研制的多级三分量井下检波器也有一些弱点：接收频率低，有 200Hz 左右的谐振，采样率受到限制等。因此，1993 年以前的多级检波器接收频率都限制在 200Hz 以内。Sleeve 在 1993 年发布了最新的研究成果，即需推靠的多级三分量高频检波器，该检波器使用了谐振频率超过 1000Hz 的接收器（Sleeve, 1991），为实现高采样率接收，该检波器使用了数字化技术，即井下数字化和光纤传输技术。

到 20 世纪 90 年代中后期，随着井下接收系统在技术上获得突破，三维 VSP 技术的研究和应用步伐明显加快。表 1-1 是截至 2001 年世界范围内进行的三维 VSP 的统计一览表。从表中可以看出，世界范围内进行的三维 VSP 工作主要集中在 1995 年以后。其主要原因就是井下检波器技术的发展，特别是井下数字多分量多级检波器的成功应用，使得三维 VSP 技术的成本大大降低。1998 年以后，全部使用了 40 级（或以上）的井下三分量检波器。

表 1-1 截至 2001 年世界范围内三维 VSP 统计表

年份	公 司	位 置	接 收	分量	参 考 资 料
1986	AGIP	Brenda	8 级	1	Mentioned in Stewart 等, 1998
1989	Phillips Pet. , Norway	Ekofisk - K17	8 级	1	J. Dangerfield, 1991
1993	Shell	Brent	5 级	3	VanderPal 等, 1996
1994	Phillips Pet. , Norway	Eldfisk	5 级	3	未出版
1995	Phillips Pet. , Norway	Ekofisk - K6	5 级	3	未出版
1995	Norsk Hydro	Oseberg	5 级	3	Boelle 等, 1998
1995	Phillips Pet. , Norway	Ekofisk - K3	5 级	3	未出版
1995	PanCanadian	Blackfoot	5 级	3	Stewart 等, 1998

续表

年份	公 司	位 置	接 收	分量	参 考 资 料
1996	AGIP, Luisella	—	—	—	未出版
1996	Petrozeit, Egypt	—	—	—	未出版
1997	British Petroleum	Magnus Field	8 级	3	Clochard 等, 1999
1997	Phillips Pet., Norway	Ekofisk - C11a	12 级	3	Dangerfield 等, 1999
1998	Chevron	Lost Hills field	40 级	3	Cornish 等, 2000, California
1998	P/GSI	San Joaquin Valley, California	40 级	3	
1999	Output Expl. Inc.	S. Louisiana Salt Basin	80/40 级	3	Constance 等, 1999
1999	PanCanadian	Weyburn Field Saskatchewan	80 级	3	未出版
2000	Crestar Energy	Coyote, Alberta	80 级	3	未出版
2000	P/GSI	Bakersfield, Calif.	80 级	3	未出版
2000	PanCanadian	Christina Lake	23 级 全部 86 级	3	未出版
2001	—	West Texas	80 级	3	未出版

到 20 世纪末、21 世纪初, 国内外不少地震仪器厂家在 VSP 井下接收系统方面的研制取得了重大进展, 这些厂家包括: OYO Geospace, CGG Sercel, I/O-P/GSI, OYO Japan, 西安弘传等。这些系统的主要特点可以概括为:

(1) 由井下模拟信号采集和传输改为井下数字信号采集和传输, 并且实现了 24 位模数转换, 动态范围大, 耐高温高压;

(2) 由单分量接收 (垂直分量检波器或水听器) 改为三分量或四分量 (三分量检波器加水听器) 接收;

(3) 由单级接收系统改为多级接收系统 (诸如 8 级、24 级、80 级, 甚至是 200 级);

(4) 采用高性能井下检波器, 耐高温高压、灵敏度高、体积小, 通常有速度、加速度及多种频率可选;

(5) 采用高速数字信号传输, 有的厂家使用了光纤, 由此保证了多级多分量井下系统的实时测量和进一步发展。

第三节 三维 VSP 技术国内外发展现状

井下多级多分量接收系统的研制成功, 大大提高了 VSP 技术的采集效率和水平, 降低了采集成本, 快速地推动了该技术行业的发展, 采集方法出现了前

所未有的更新,推动了处理 and 解释的前进步伐,拓宽了应用范围,提高了应用效果,带来了广阔的市场。

VSP 技术经过 30 年的发展,应用范围越来越广,效果越来越好,特别是三维 VSP 技术的发展更是日新月异。

1996 年 Qi Zhang 等发表了“3D - VSP Survey Design and Data Analysis”一文,对三维 VSP 的面元计算方法进行了论述,同时建立地质模型和物理模型并进行了模拟,该文对三维 VSP 的观测系统分析及资料处理工作都具有重要意义。2000 年, Ludmila Adam 等人的“Isotropic and Anisotropic Multiazimuth VSP Seismic Modeling in The Sierra de Perijá, Venezuela”一文提出了进行井

中 VSP 设计与合成模拟的方法,对委内瑞拉西部 Guarant 地区的模拟结果指导了 VSP 方法的选择。Jean - Paul Van Gestel 在 2002 年发表的“VSP Survey Design Using Finite Difference Modeling”,利用了有限差分模型得到的合成记录资料,研究了不同炮间距、最大井源距和检波器位置对最终成像质量的影响。

Bakersfield 地区一共采集了 8 口井的三维 VSP 资料(图 1-2),这种采集方式甚至可以部分代替地面三维地震。

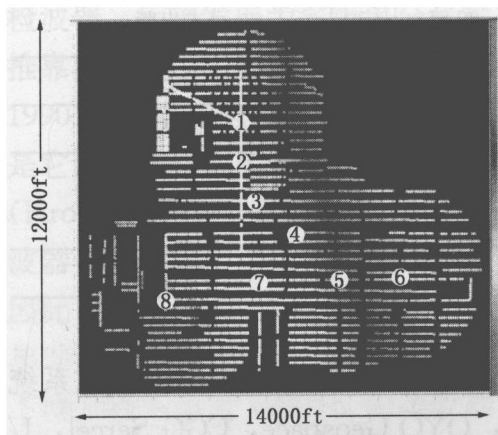


图 1-2 Bakersfield 地区
三维 VSP 井位及炮点

三维 VSP 测量的重要作用在于提高成像分辨率及其效果等方面能与地面地震勘探的结果形成互补,特别是在利用地震信息估算参数方面的互补,诸如各种地震速度、近地表畸变影响、各向异性参数甚至 AVO 标定等。因此,井地联合采集、处理也越来越受到重视。比较著名的实例有美国的 Louisiana (P. E. Constance, 1999)、加拿大的 Alberta (Satinder Chopra, 2002) 等。

在处理上,最小平方矢量波场分离技术 (W. Scott Leaney, 2002)、三维地面地震和三维 VSP 同时采集资料的处理和综合研究 (Satinder Chopra, 2002)、利用 VSP 资料对地面地震资料进行高频恢复 (Satinder Chopra, 2003)、利用 3D 3C VSP 资料进行井旁特征描述 (Vladimir Stenin, 2003) 等方面的研究已见成果。

近几年来,VSP 资料的应用深度越来越广。最近最为热门的应用有用 VSP 资料提高地面地震分辨率(比如 Corelab 公司的 HFR 技术和 FBE 技术等)、井地联合反演等。

目前,世界上进行的三维 VSP 观测通常是在围绕井口最大半径大约为 2km

左右的范围内（具体的最大井源距与目的层深度和要求的成像范围有关），地面激发点阵列一般呈矩形或圆圈形分布，类似地面三维地震勘探，井中三分量（或四分量）检波器接收。

国外目前正在研究的一项有意义的工作就是针对某一目的层位用三维 VSP 成像资料代替地面地震资料，并且已经取得一些有价值的成果。该方法主要针对具体层位，分别在工区内的井中进行采集，一般情况下不使用工区内的所有井。该方法由于投资少、效率高、资料精度高等特点越来越受到人们的重视。

目前在国内实施三维 VSP 较少，新疆进行过真正意义上的三维 VSP 采集工作，工作方法和成果未发表。

从三维 VSP 的发展趋势来看，在采集方式上主要就是根据地下地质体的成像要求布置地面炮群，或者与地面地震联合采集（这时炮群的布置方式就要受限于地面地震观测系统，往往需要加密炮群以满足三维 VSP 的需要）。使用多级的井下检波器（最多已经达到 80 级）进行三维 VSP 观测已经是大势所趋。

第四节 三维 VSP 技术实用性研究

从目前的情况看，国内各老油田、老油区，已进行了多年的油气开发工作，新的勘探区域越来越小，寻找新的储量越来越困难，面临着如何充分利用现有储量，提高采收率的问题，这就要求有精细的地震成像及准确的地下参数，所以发展三维 VSP 技术是非常有必要的。

通过三维 VSP 测井技术研究，进一步完善和发展 VSP 技术及应用，将 VSP 技术用于油田勘探开发的全过程，包括储层描述、油藏工程、油气检测等。帮助解决井旁细微构造、描述岩性、裂缝参数，更好地配合各井区的地震资料解释，为各井区的油藏描述提供重要依据，同时将 VSP 资料的高频特点用于与地面地震资料联合成像，可以获得高精度的成像资料，为油田的增储上产服务。

国内目前在三维 VSP 的采集处理技术研究上与国外相比有一定差距，而三维 VSP 资料的重要作用已被认可，因此开展三维 VSP 采集处理技术研究，优化三维 VSP 采集方式，并考虑与地面地震联合采集的施工方式，提高施工效率，获得高精度的资料，对油田的勘探开发工作都具有重要意义。

第五节 三维 VSP 研究内容与创新点

本书研究的目的是希望通过研究，形成一套三维 VSP 采集技术设计的方法流程。但是该方法流程需要适应不同地区地质与开发的需求，因此该方法流程