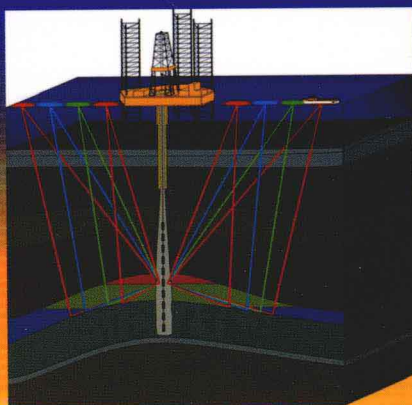


三维垂直地震

剖面资料处理与解释技术

——以胜利油田垦 71 井区为例

◆ 乔玉雷 著



石油工业出版社

三维垂直地震剖面资料 处理与解释技术

——以胜利油田垦 71 井区为例

乔玉雷 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书是对三维垂直地震剖面技术的系统总结,内容包括三维垂直地震剖面发展现状、观测系统设计、波场特征、正演模拟、波场分离、纵波与转换波资料成像、综合解释等,特别针对胜利油田垦 71 井区的方法技术的应用性与效果分析,对该项技术的生产应用具有很好的指导作用。

本书可供从事油气地球物理勘探和开发地震的工程技术人员及石油院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

三维垂直地震剖面资料处理与解释技术:以胜利油田垦 71 井区为例/
乔玉雷著. —北京:石油工业出版社, 2011. 5

ISBN 978 - 7 - 5021 - 8350 - 9

I. 三…

II. 乔…

III. 三维 - 垂直地震剖面法 - 东营市

IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 044099 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

编辑部: (010) 64523736 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 保定彩虹印刷有限公司

2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本: 1/16 印张: 8.75

字数: 221 千字

定价: 40.00 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

自 20 世纪 80 年代以来,垂直地震剖面(以下简称 VSP)技术便获得了长足的进步,在井旁精细构造成像、井旁断层识别、井旁地层岩性描述、地震波衰减、速度各向异性、孔隙压力预测和孔隙度估算等方面都取得了许多实际应用效果。

国外许多公司已经可以初步提供从数据采集、处理到解释的全套三维 VSP 服务。在北海油田利用三维 VSP 的纵横波对盐丘成像,消除了气云的干扰,断层成像清晰,提高了地层解释精度。在墨西哥湾、中东地区进行了三维 VSP 资料的采集、处理,均取得了比较好的成像效果。国外研究机构在三维 VSP 资料处理、解释领域开展了比较深入的研究,取得了一定的进展,如美国的 VSFusion 和 GeoTomo 合作开发了 VS3 三维 VSP 处理系统,美国的 Niversal 公司、挪威的 Read 公司和俄罗斯的一些公司也相继开发了各具特色的三维 VSP 资料处理系统。预计今后几年,三维 VSP 技术将在进一步完善的同时获得更多的实际应用,以解决井周三维精细成像和储层解释。

国内的三维 VSP 技术研究起步相对较晚,几大油田和物探研究单位如胜利、大庆、江苏等油田以及中国石油东方地球物理公司、中国石化石油勘探研究院等单位先后进行了三维 VSP 技术的探索性的研究和试验,在波场分离与成像等方面,具有一定的技术积累,取得了一些经验,但目前仍有一些关键性技术问题还没有突破,仍处于技术的试验阶段,尚未形成实际生产能力。

现在,三维 VSP 技术已经成为油藏综合地球物理的重要组成部分,中国石化胜利油田已经初步形成了由方案设计、资料采集、资料处理、综合解释和相应软件系统的完整而实用的三维 VSP 配套技术系列,具备了一定三维 VSP 生产能力,开始为油气开发提供技术服务。

本书是笔者根据多年来积累的三维 VSP 实际工作经验,结合国内外最新技术进展和成果所作的系统总结。全书共分八章,在绪论中简要叙述三维 VSP 技术国内外发展现状以及三维 VSP 技术在胜利油田垦 71 井区的应用情况,后面按照章节分别详细地论述三维 VSP 设备、观测系统设计、波场特征、正演模拟、波场分离、纵波与转换波资料成像和综合解释等各个环节的理论、方法、实施流程和成果分析,比较全面地介绍了三维 VSP 这一新兴技术的各方面内容。在波场分离、纵横波成像和综合解释等方面,根据三维 VSP 的特点提出了一些新的观点和思路,笔者希望能与业界的专家们商榷与讨论,以促进三维 VSP 技术的发展和应用。

全书由乔玉雷博士主笔编写并统稿,姚忠瑞高级工程师、孙卫国高级工程师、王成礼博士提供了波场分离和纵波成像方面的研究资料,王珺博士提供了转换波成像的资料,乔玉雷完成了综合解释和应用方面的研究内容。几年来大家经常就一些关键的技术细节相互切磋,

许多新的观点和思路正是在讨论研究之中形成，这些成果也是该书的重要组成部分。

在本书的编写过程中，中国石化胜利油田分公司物探研究院王延光、孟宪军、夏吉庄，胜利油田物探公司冯刚、于静等领导给予了充分的关注和支持。姚忠瑞、孙卫国、张宝银、王成礼、王珺、李守军等专家为本书的编写提供了许多有用的资料。正是这些宝贵的资料和分析成果，为三维 VSP 技术奠定了坚实的基础。在此笔者对他们表示崇高的谢意。

中国石化石油勘探开发研究院、同济大学、中国石油大学（华东）、山东科技大学等单位进行了大量的三维 VSP 基础理论研究工作，为本书的编写提供了有力帮助。在此向他们表示感谢。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 三维 VSP 技术国内外发展现状	(1)
1.2 三维 VSP 技术在垦 71 井区的应用	(4)
1.3 各章节内容安排	(8)
第二章 VSP 采集装备	(10)
2.1 震源	(10)
2.2 井下检波器	(12)
2.3 地面记录仪器	(13)
第三章 三维 VSP 观测系统设计及分析	(14)
3.1 观测系统设计	(14)
3.2 垦 71 井区三维 VSP 观测系统分析	(20)
3.3 认识与结论	(24)
第四章 粘弹波波动方程正演模拟及波场特征分析技术	(25)
4.1 粘弹波波动方程的理论基础	(25)
4.2 正演模拟波场特征及分析	(35)
4.3 认识与结论	(39)
第五章 三维 VSP 波场分离技术	(40)
5.1 三维 VSP 波场特征的认识	(40)
5.2 原始资料波场分析	(43)
5.3 初至拾取	(50)
5.4 波场分离	(52)
5.5 认识与结论	(65)
第六章 三维 VSP 纵波成像技术	(66)
6.1 基于波场外推算子波动方程深度偏移成像方法	(68)
6.2 非稳态算子的相移叠前深度偏移成像方法	(74)
6.3 偏移速度场的建立	(77)
6.4 反褶积	(79)
6.5 垦 71 井区实际资料偏移成像及效果分析	(80)
6.6 认识与结论	(83)
第七章 三维 VSP 高斯束法转换波偏移成像	(84)
7.1 三维 VSP 共检波点高斯束叠前深度偏移	(84)
7.2 实际资料处理效果	(90)
7.3 认识与结论	(94)
第八章 三维 VSP 综合解释技术	(95)

8.1	三维 VSP AVA 属性参数反演	(95)
8.2	井周地层品质因子反演	(114)
8.3	构造储层解释	(118)
8.4	认识与结论	(127)
参考文献		(128)

第一章 绪 论

1.1 三维 VSP 技术国内外发展现状

VSP (Vertical Seismic Profiling) 即垂直地震剖面, 是一种地震观测方法, 它与通常地面观测的地震剖面相对应。垂直地震剖面方法是在地表附近的一些点上激发地震波, 在沿井孔不同深度布置的多级多分量检波点上进行观测。在 VSP 资料中, 因为检波器通过井置于地层内部, 不仅能接收到自下而上传播的上行纵波和上行转换波, 也能接收到自上而下传播的下行纵波及下行转换波, 甚至能接收到横波。这种特殊的观测方式, 较地面地震而言, 具有以下优势: 地震波单程衰减, 地震信号频率较高; 检波器深度定位, 提高了速度分析精度; 检波器离目的层更近, 保证了振幅畸变小; 三分量检波器采集, 能得到 PP、PSV 波成像数据体; 震源可重复性容易实现; 可以方便估算井周各向异性参数。但 VSP 技术也存在一些缺点: 野外采集工艺比地面地震复杂施工难度大; 冬季施工困难更大, 需要井孔、电缆、电缆车、井下检波器等特殊设备; 测量范围有限, 成像孔径小。

VSP 技术在油气勘探中的贡献包括: 避开低速带的影响, 记录的分辨率较高; 地表恶劣地区可用 VSP 测量填补地面地震的空白带; 确定地震同相轴与地质层位的对应关系; 预告钻井未钻遇地层的埋深; 提供子波、反褶积因子、速度、反射系数、衰减系数等物理参数; 正确识别多次波; 可采集到多波多分量记录, 有利于井孔周围油藏的研究; 与地面勘探资料结合, 可减少地震反演的多解性; 与声波资料结合有利于薄层研究。

VSP 技术从出现到现在有近 70 年的历史。20 世纪 40 年代开始出现和发展地震测井技术。1949 年, 在第二次世界大战中应用在潜艇上的声呐技术被移植到测井工艺中, 出现了连续声波测井技术。1959 年, 苏联首次提出了 VSP 方法勘探。60 年代成功地利用 VSP 资料识别波场。我国于 1980 年起开始调研, 相继开展试验研究, 1984 年开始引进国外设备, 1986 年以后 VSP 技术迅速推广应用。

20 世纪 80 年代始, 国内外石油工业界对 VSP 技术进行了大量的研究开发工作, 在地震波速度与衰减参数的精确测定、地层标定、地层岩性描述方面取得了许多实际的应用效果。进入 90 年代, VSP 数据采集方式明显增多, 为适应不同的地质目的, 设计出了各种各样的观测系统, 从零偏 VSP 到非零偏 VSP, 再到多方位 VSP、多偏移距 VSP 和变偏 VSP, 直至三维 VSP。这些新的观测方式, 在解决储层预测和储层描述 (精细构造特征、岩性、孔隙度、各向异性、地层弹性参数等) 等方面有效地弥补地面地震的不足。

我国从 20 世纪 80 年代初开始开展 VSP 技术的研究工作。近年来在常规 VSP 的应用方面取得了较大发展, 有些油田已将其列入区域探井系列, 且作为常规完井程序。VSP 的技术发展轨迹严格遵循由点 (零偏移距) 到面 (非零偏移距和 Walkaway VSP) 再到体 (三维 VSP) 的趋势。利用井中地震资料做井旁构造成像及岩性分析是一种十分有效的勘探技术, 二维 VSP 勘探已取得了很大的成功, 但二维资料的成像不能充分描述大多数三维地质体。

随着石油工业对油藏描述技术的要求不断提高，三维 VSP 技术应运而生，并迅速得到发展。

1986 年，AGIP 第一次完成了三维 VSP 采集，自此以后，又进行了多次三维 VSP 的采集。在进行的 VSP 和三维地面地震资料同时采集的试验结果表明，在成本效率和提高地下成像等方面均取得了令人鼓励的结果。1994 年，美国 EXXON 石油公司在得克萨斯州利用三维 VSP 观测资料实现了油藏的成像，它的优点是受地表条件限制少，采集周期短，处理快，费用低，且可重复用于油藏监测。1999 年，CGG 公司在 Ekofisk 油田进行了三维环状等角反射的 VSP 观测，解决了地面地震无法解决的气顶无反射问题，他们在采集之前先做了实验，证明反射角不超过 38° 可以获气云下地层的反射，因此设计了环状的三维 VSP 观测系统，该系统不仅具有可得到高精度地震图像的优点，且施工方便，剖面比其他观测系统更长，无 AVO 效应。三维 VSP 技术的发展在 1998 年达到了高潮；在 1998 年召开的第 68 届 SEG 年会上有八篇文章论及三维 VSP 技术，主要涉及三维 VSP 的快速射线追踪、资料处理和克希霍夫深度偏移等方面。近几年，三维 VSP 技术在研究地层的各向异性 (Rossi G, 2001)、裂隙型油藏特征的描述 (Horne S A, 2000)、与三维地面地震联合采集 (Constance P E, 1999) 以及时延 VSP 技术监测气驱前缘 (Anna Droujinina, 2000) 等方面进行了更深入的研究和尝试，取得了一些应用成果。国外在三维 VSP 技术研究和应用方面取得了显著的技术进步，在研制了多种多级检波器系统的基础上，已将三维 VSP 技术与井间地震技术联合，广泛应用于各种类型油田的开发和动态监测。国内在包括 Walkaway VSP、Walkaround VSP、三维 VSP 在内的非常规 VSP 方面起步较晚，近几年做了一些多方位 VSP 和 Walkaway VSP 实验，没有形成商业生产能力，而在三维 VSP 勘探技术的研究方面才刚刚起步，无论在仪器设备，还是方法技术等方面都远远落后于国外发达国家。中国石油东方地球物理公司、胜利油田、河南油田和中海洋石油总公司等也进行了三维 VSP 资料的野外采集，虽然也已取得了一些成果，但由于三维 VSP 数据处理技术的限制，还没有完全体现出三维 VSP 技术解决问题的能力。

近几年，三维 VSP 测量技术研究和应用发展的步伐明显加快，究其原因可归结为两个方面：(1) 油田勘探与开发需求日益增强，多学科的综合性和应用已成为解决目前地质问题的有效手段；(2) 井下接收系统在技术上有了重大突破。但是三维 VSP 的观测系统比较特殊，其数据处理方法既不同于常规的非零偏移距多分量 VSP 数据处理方法，也有别于地面多分量地震方法，三维 VSP 对处理技术的要求更高，因此三维 VSP 数据处理成了当前发展三维 VSP 技术的瓶颈，以至于花费高额代价采集得到的三维 VSP 数据无法处理，更无法指导油气勘探工作。

三维 VSP 数据的处理流程和方法远不如零偏移距和非零偏移距 VSP 的规范，许多做法仍处于探索之中，其共同难点表现在以下几个方面：(1) 波场分离仍是三维 VSP 数据处理的一项基础工作，许多波场分离方法仍是套用常规 VSP 的处理方法，而且多数处理工作实际上只使用了 Z 分量数据，多分量信息没有得到充分利用；(2) 三维 VSP 数据的速度分析和研究仍是薄弱环节，国外普遍采用的是一维速度模型或在一维速度模型的基础上修改的各向异性速度模型，国内则是利用零偏移距、非零偏移距以及速度测井资料建立速度模型，没有充分利用三维 VSP 数据本身的信息进行速度分析；(3) 很少有成功利用三维 VSP 数据进行衰减层析成像的报道；(4) 复杂地质体成像方法有待发展和完善，在成像过程中，仍有相当一部分采用常规 VSP CDP 转换方法，部分借用地面地震的克希霍夫偏移成像方法，VSP CDP 转换方法主要基于一维速度模型，不能用于二维甚至三维速度模型，该方法只适用于

水平地层,当地层倾角较大时,构造会发生畸变,波形也易受到拉伸和压缩,在复杂介质条件下,由于多值走时和焦散点的大量存在,已有的克希霍夫偏移经常不能获得满意的成像效果;(5)很少有关于三维转换波成像以及三维多波数据体成功应用的报道。因此尽快开发有效的三维 VSP 数据处理技术是当前研究的迫切任务。

下面将从采集、常规处理(包括波场分离)、纵波叠前深度偏移以及矢量波场叠前深度偏移等多方面介绍三维 VSP 领域国内外科研领域的一些研究成果。

Alexander Goertz 等(2005)通过估算菲涅尔带范围来优化三维 VSP 观测系统设计。Adrian Sanchez 等(2005)介绍了在两井中同时观测三维 VSP 技术。梁运基等(2006)探讨了泌阳凹陷井地联合三维 VSP 观测采集方法。王建民等(2007)研究了三维 VSP 观测系统设计方法。Xu Gang 等(2009)介绍了大排列三维 VSP 和全方位地面地震联合采集技术。崔炯成等(2007)介绍了斜井三维 VSP 观测系统设计方法。刘美丽等(2008)讨论了胜利油田垦 71 井区三维 VSP 采集方法及其效果。

在三维 VSP 地震资料模拟环节,国内外一些学者也进行了不少尝试。刘学才等(1995)利用高斯射线束法合成三分量 VSP 记录。Wei Liu 等(1999)实现了三维 VSP 弹性波正演,并在墨西哥湾野外采集设计中进行了应用。王成礼等(2006)介绍了三维 VSP 弹性波动方程正演模拟方法,并分析波场特征。李桂花(2007)利用射线方法进行了三维 VSP 波场模拟工作。仇燕(2008)基于射线法实现了斜井三维 VSP 正演工作。赵俊省等(2010)利用射线追踪方法实现了斜井三维 VSP 正演工作。

Jean-Luc Boelle 等(1998)分析了 VSP 处理中的难点,其中包括水平分量旋转、波场分离、下行波反褶积、三维成像等环节。C O H Hindriks 等(1998)对三维非规则采集的 VSP 数据在 Randon 域进行重建。W Scott Leaney 等(2002)将各向异性矢量平面波分解应用于三维 VSP 资料的波场分离工作中。严又生等(2005)介绍了三维三分量 VSP 资料处理方法,并在 MB2003 井区成果进行了应用。Jianhua Yu 等(2005)使用偏移反褶积技术提高三维 VSP 资料照明度。Qinglin Liu 等(2005)使用下行 VSP 多次波估算近地表速度模型,并作为静校正模型。张卫红等(2006)讨论了垦 71 井区三维 VSP 资料波场分离方法,叠加消去法和中值滤波相结合以及 F-K 滤波和中值滤波相结合方法效果较好。Zhiyong Jiang 等(2007)实现了数据驱动三维 VSP 资料多次波预测工作。Alex Goertz 等(2008)给出了宽孔径三维 VSP 资料保高频信息方法。Blais E(2008)实现了三维三分量 VSP 资料速度分析和波场分离工作。Dongjie Cheng 等(2008)实现了 VSP 资料震源-检波器一致性反褶积工作。姚忠瑞等(2009)介绍了一种三维 VSP 高保真最优逼近逐一波场分离方法。孙文博等(2009)研究了三维三分量 VSP 资料矢量波场分离方法。苏媛媛等(2010)介绍了斜井三维 VSP 资料动校正叠加方法。

Paul Bicquart(1998)将克希霍夫叠前深度偏移算法应用于三维 VSP 资料中。Genmeng Chen 等(2000)实现了三维 VSP 资料快速 VSP CDP 成图工作。王华忠等(2001)给出了 VSP 资料波动方程叠前深度偏移算法,并给出了 VSP、地面地震和井间地震等资料立体成像算法。M Gherasim 等(2005)实现了三维 VSP 资料弹性波克希霍夫叠前深度偏移算法。ZhiYong Jiang 等(2005)利用 VSP 资料多次波进行成像。方伍保等(2006)给出了三维 VSP 资料波动方程叠前深度偏移算法,背景波场采用相移法进行成像,扰动场采用频率空间域有限差分法进行成像。Albena Mateeva 等(2007)基于可控虚震源思想实现了三维 VSP 资料偏移算法,并应用于盐和盐下构造成像。Ruiqing He 等(2007)对 VSP 资料自由表面多

次波,利用三维波动方程干涉偏移方法进行成像。陈生昌等(2008)在三维 VSP 偏移成像中借助于波动方程叠前深度偏移成像算法的概念,实现了满足时间域速度横向变化的叠前时间偏移算法。乔玉雷等(2008)介绍了基于非固定算子相移法三维 VSP 叠前深度偏移方法,该方法能适应速度横向变化,能对大倾角构造进行准确归位,具有较高的精度和稳定性。牟风明等(2008)利用分步傅立叶变换在混合域进行波场外推,在频率一波数域实现波场相移,在频率一空间域实现时移校正,从而完成三维 VSP 资料叠前深度偏移工作,保持横向变速地质构造成像精度并提高计算效率。W Scott Leaney 等(2009)将最小二乘偏移方法应用于三维 VSP 资料进行成像。Tom Burch 等(2009)在墨西哥湾 Deimos 油田利用三维 VSP 资料对盐下构造进行成像。Min Lou 等(2009)采用选择孔径进行成像和阻尼最小平方平滑技术压制 VSP 偏移噪声。Mark A Roberts 等(2009)利用透射 VSP 资料对盐侧构造进行三维波动方程偏移。Satish Sinha 等(2009)利用 VSP 资料所得到的格林函数来对地面地震资料进行三维深度成像。Calin Cosma 等(2010)采用成像点转换法实现了三维 VSP 资料偏移成像,压制了 VSP 资料各成像点覆盖次数不均产生的成像假象问题。

John O'Brien 等(2006)实现了 VSP 资料多分量成像并用于致密含气砂岩储层识别中。Yogesh Agnihotri 等(2007)实现了三维三分量 VSP 资料省时偏移方法。Min Lou 等(2008)采用虚震源方式实现了 VSP 资料矢量偏移。Jacques Leveille 等(2008)实现了三维 VSP 纵波和转换波资料逆时偏移算法,并在墨西哥湾深盐下构造勘探区块进行应用。Zhixia Ma 等(2009)将 VSP CDP 近似公式应用于三维 VSP 纵波和转换波资料成像中,并成功地应用于塔里木盆地轮古 38 区块中。Wenbo Sun 等(2009)采用 Kirchhoff 偏移方法实现了三维纵波和转换波成像,并应用于塔里木盆地裂缝性和碳酸盐岩储层识别中。Denis Kiyashchenko 等(2009)采用波动方程矢量偏移对盐下构造进行成像。

Xin Wei 等(2005)进行了三分量 VSP 成像和吸收系数估算的研究工作。Steve Horne 等(2008)利用三维 VSP 资料进行各向异性参数反演工作。Jason E Gumble 等(2008)利用三维 VSP 资料进行 AVA 分析,计算纵横波速度比,预测盐下孔隙压力预测。Rosemarie Ramkhelawan 等(2008)介绍了三维 VSP 在 Wyoming 地区 Wamsutter 油田的应用情况,VSP 解释成果大大提高了该油田增产潜力的认识。Emanouil Blias(2009)利用 Walkway 和三维 VSP 地震资料估算 VTI 介质和正交各向异性介质的层各向异性参数。Anish V Varghese 等(2009)采用谱比法对三维 VSP 资料分方位计算品质因子 Q ,并与走时各向异性进行相关分析,并建议在多方位地震资料处理和解释过程中参考分方位品质因子和走时各向异性等结果。Müller K W 等(2010)通过 Abu Dhabi 地区两期三维 VSP 资料成像效果对比并与地面地震成像效果进行比较,在此基础上进行构造和储层解释,三维 VSP 资料在井周围可以作为地面地震资料一个很有价值的补充,其频带范围比地面地震广,提高了断层和薄层识别能力,从而提高油藏描述精度,可以作为有价值的油藏监测手段,对油藏进行动态评估,并对薄层进行准确成像。

1.2 三维 VSP 技术在垦 71 井区的应用

2002 年 11 月,“油藏综合地球物理技术研究”被列为中国石油化工集团公司“十条龙”重点科技攻关项目。2004 年 11 月确定了作为油藏综合地球物理研究试验区的垦 71 区块联合采集方案,并于 2005 年 5 月圆满完成了资料采集工作,共获得 5 套高质量的数据体:

高密度三维地震数据体、数字 Z 分量三维地震数据体、数字 X 分量三维地震数据体、数字 Y 分量三维地震数据体和三维三分量 VSP 数据体。

1.2.1 工区概况

1.2.1.1 地理位置

垦 71 井区位于山东省东营市河口区罗镇以东，河口区与利津县交界处，南为黄河，黄河故道沿南北向斜穿工区。部署满次勘探面积 19.30km^2 ，部署勘探坐标范围为：20642830/4186985、20647550/4186985、20647550/4182895、20642830/4182895（图 1.1）。

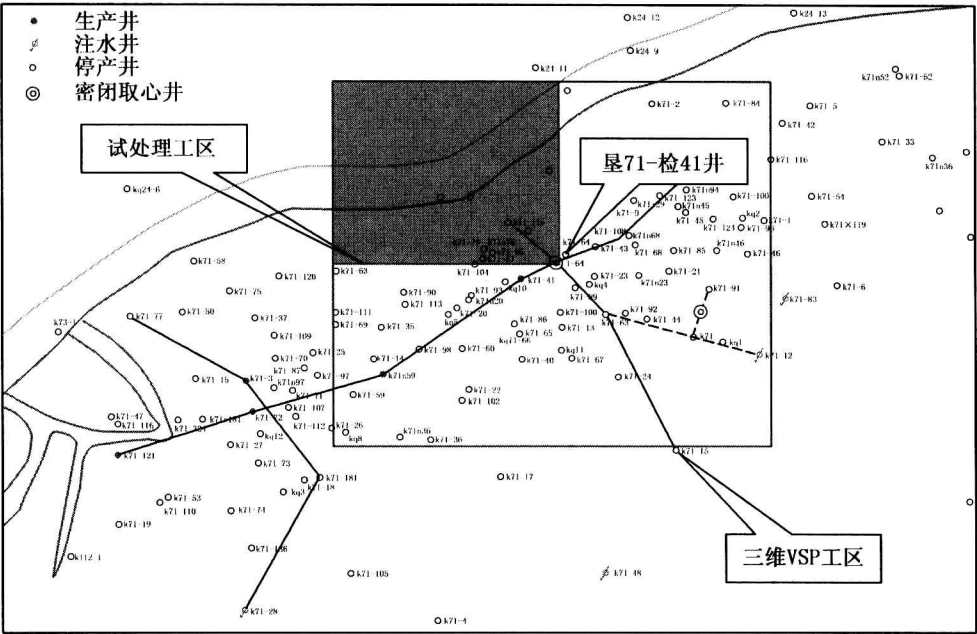


图 1.1 垦 71 井区三维 VSP 施工和处理位置图

1.2.1.2 构造位置

工区构造位置位于沾化凹陷中部，孤岛凸起西南端，地下断裂系统发育，是胜利油田垦西油田的主力开发区，西北为渤南洼陷，南为三合村洼陷（图 1.2）。

1.2.1.3 工区地表条件

工区内农业较发达，主要以棉花、大豆、玉米为主，西部是浙江横店草业集团承包的苜蓿地。工区西北部分布有鱼池、虾池、蟹池，工区西南部为芦苇塘，黄河故道位于工区东部，由南至北贯穿整个工区，周围水洼较多，整个工区水域面积约占整个施工面积的 25%。

工区属老油区，工农关系复杂，工区内油井、泵站林立，油、气、水管线纵横交错，主要集中在工区的中部及北部。

工区内交通条件差，公路主要是围绕井场所建，道路较少。东港高速呈东北—西南走向贯穿工区东南部，桥洞少（图 1.3）。

1.2.1.4 表层地震地质条件

工区内地势平缓，潜水面较浅工区内潜水面一般在 10m 左右，激发岩性稳定，主要为含沙泥岩，激发条件较好。

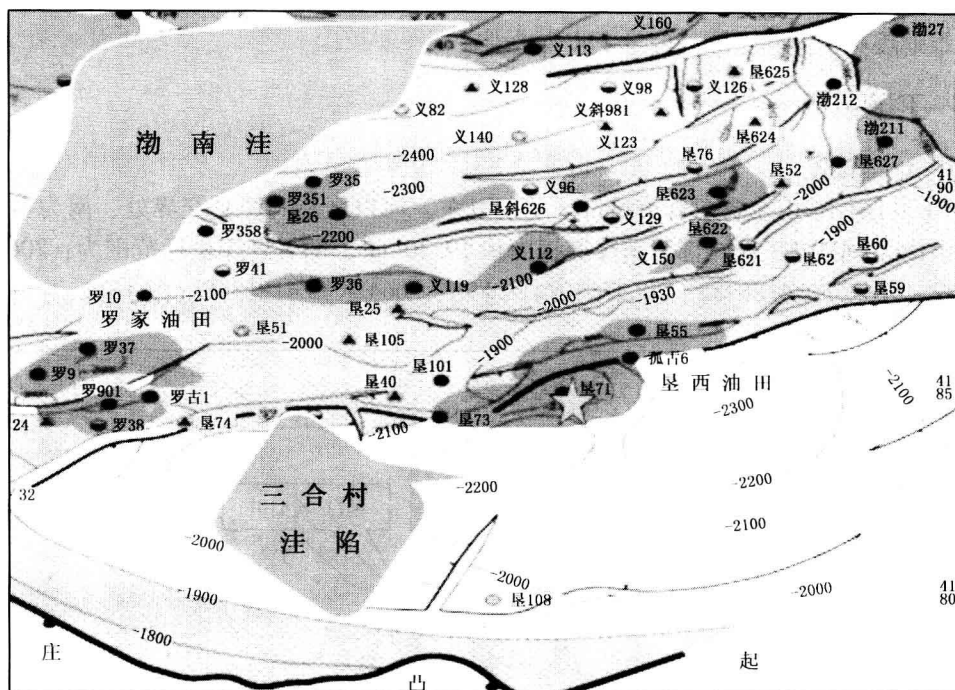


图 1.2 工区构造图

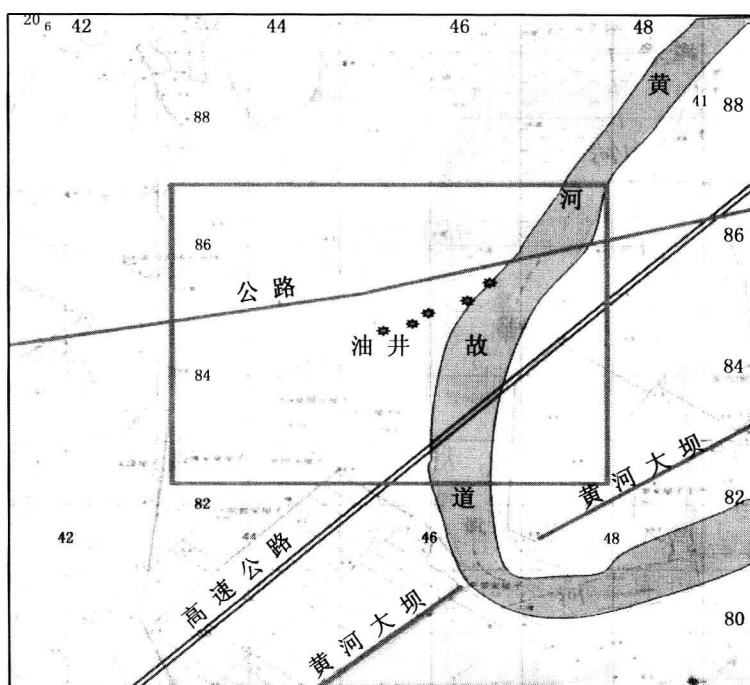


图 1.3 工区地理图

1.2.1.5 地下深层地震地质条件

新近系明化镇组与馆陶组属河流相砂泥岩互层沉积,构造上为整合或假整合,没有很好的区域标准反射层, T_0 与 T_1 振幅较弱,连续性不好;自古近系东营组以下,属湖相沉积,来自沙河街组内部最大湖泛面特殊岩性地层的 T_2 、 T_4 、 T_6 等稳定强反射标准层可全区追踪。垦西大断层深层中生界顶与上升盘潜山部位古生界顶是强烈构造隆起运动后的剥蚀面,波阻抗强,不整合特征明显,形成本区的一级层序界面 Tr 与 Tg 。潜山内幕有古生界奥陶系灰岩和寒武系页岩的大倾角强反射。

1.2.2 井地联合采集设计

为了保证三维 VSP 与地面地震记录的地震资料可比性,要求激发环境、激发子波等方面的一致性,要达到此目的,三维 VSP 与地面地震必须共用炮群、同步接收。

单纯使用三维地震炮群,可以使地面地震和三维 VSP 采用统一的面元,便于横向对比。但是三维 VSP 会存在较大的覆盖次数空白带,非过井剖面无论纵波还是转换波成像质量将会较差,存在成像空白区,该成像资料无法满足解决地质任务的要求,所以需要加密炮群,有效的炮点加密可以弥补覆盖次数空白。

根据采集设计在垦 71 - 检 41 井进行零井源距、非零井源距和三维 VSP 测量,其参数大致为:

(1) 零井源距:井号为垦 71 - 检 41 井,观测深度 5 ~ 1770m,观测点距 5m,物理点数 354,井源距 52.3m,激发井深 15m,激发药量 7.4 kg,激发井方位 264.5°,井下检波器为 DDS - 250 三分量检波器,级数 12,记录仪器 GEORES,记录长度 6s,采样间隔 0.5ms,记录格式 SEG - 2,子波检波器三分量检波器,与大井距离 46.37 m,埋深 20m。

(2) 非零井源距:井号为垦 71 - 检 41 井,观测深度 290 ~ 1685m,观测点距 5m,物理点数 280,井源距 1100m,激发井深 13m,激发药量 4kg,激发井方位 270°,井下检波器 DDS - 250 三分量检波器,级数 14,记录仪器 GEORES,记录长度 6s,采样间隔 0.5ms,记录格式 SEG - 2。

(3) 三维 VSP:面元大小为 3km × 3km,炮点距为 20m,但炮线距不规则,最大偏移距 2118m,接收道数为 14 道,激发井深 13 ~ 19m,激发药量 1 ~ 4kg,药型为湖北凯龙高密度,检波器型号为 DDS - 250,三分量检波器,检波器级数 14,级间距 10m,采用软连接级连方式,沉放深度 800 ~ 930m,地震仪器 GEORES,采样间隔 1ms,记录长度 8s。

1.2.3 三维 VSP 处理技术

三维 VSP 处理存在几个比较难而且关键的技术环节,包括三维 VSP 波场分离技术、三维 VSP 纵波成像技术和三维 VSP 转换波成像技术。

针对三维 VSP 资料的波场特点,建立了以原始资料波场分析为基础、以精确的初至为保障、以最优逼近逐一分离法和浮动坐标系极化滤波方法为手段的处理流程,得到令人满意的分离效果,提高了上行反射 P 波高保真、保幅特性。

采用基于波场外推算子波动方程深度偏移成像方法和非稳态算子的相移叠前深度偏移成像方法对三维 VSP 纵波资料进行成像,它适合于复杂介质,计算效率高。与地面地震剖面整体效果相似,波组关系比较一致,吻合较好。中深层从视分辨率上看高于地面地震;与地面地震相比,在低序级断层、微幅构造刻画能力上优于地面地震。

采用三维 VSP 共检波点高斯束叠前深度偏移方法对该区 VSP 转换波进行成像, 由于横波速度模型难以建立, 还由于转换波的波场特点 (在近偏移距能量弱等) 以及三维 VSP 波场分离困难, 很难分离出准确地转换波记录, 因此转换波成像难度很大, 但在该区转换波成像仍取得一定的效果, 可以通过纵横联合解释识别油气水分布, 为油田开发提供依据。

1.2.4 三维 VSP 综合解释技术

三维 VSP 综合解释技术, 完成了三维 VSP AVA 属性参数反演、品质因子反演以及三维 VSP、地面高精度地震联合构造解释以及储层解释工作。

三维 VSP 资料成像孔径小, 缺少小入射角信息或者入射角覆盖范围小, 因此三维 VSP 资料 AVA 反演难度较地面地震大, 但在垦 71 井区也取得了一定效果。

对垦 71 井区三维 VSP 资料进行品质因子反演, 反演结果与实际情况吻合。

应用三维 VSP 纵横波资料及联合 AVA 分析等多种资料和手段, 并结合地面高精度资料, 能精细刻画井周微幅构造, 进行薄储层的描述和流体的识别。

1.3 各章节内容安排

本书共分八章, 各章内容安排如下:

第一章分别介绍三维 VSP 技术在国内外研究现状以及三维 VSP 技术在胜利油田垦 71 井区的应用情况。

第二章介绍 VSP 装备, 包括井下仪器, 地面震源以及地面记录设备等。

第三章介绍三维 VSP 观测系统设计及分析, 首先介绍了线性观测系统、环形观测系统、放射状观测系统和斜井 VSP 观测系统等观测方式及其波场特征, 然后介绍了观测系统参数计算方法, 并给出了观测系统设计实例, 最后分析了垦 71 井区三维 VSP 观测系统。

第四章介绍了粘弹波波动方程正演模拟及波场特征分析技术, 首先从粘弹波波动方程的理论基础入手, 包括粘弹介质中的波动方程、地震波的衰减及介质品质因子 Q 、二维粘弹性波动方程的高阶差分近似; 然后介绍了正演模拟波场特征, 包括弹性波波动方程正演模拟及波场特征、粘弹波波动方程正演模拟及波场特征等。

第五章介绍了三维 VSP 波场分离技术, 分别从三维 VSP 波场特点、原始资料波场分析、初至拾取、波场分离等方面进行介绍, 其中在波场分离环节介绍了最优逼近逐一分离方法和浮动坐标系极化滤波两种方法。

第六章介绍了三维 VSP 纵波成像技术, 首先分析了克希霍夫偏移和 VSP CDP 成像方法的优缺点, 然后介绍了基于波场外推算子波动方程深度偏移成像方法和非稳态算子的相移叠前深度偏移成像方法, 接着介绍了偏移速度场的建立和反褶积方法, 最后介绍了这些成像方法在垦 71 井区的成像效果。

第七章介绍了三维 VSP 转换波成像技术, 分别介绍了三维 VSP 共检波点高斯束叠前深度偏移及其在垦 71 井区中的应用。前者具体介绍了运动学射线方法基本理论、三维动力学射线追踪基本原理、三维高斯束基本原理、波场重建法计算走时和动力学射线参数以及理论模型试验等方面内容。

第八章介绍了三维 VSP 综合解释技术, 包括三维 VSP AVA 属性参数反演、井周地层品质因子反演和构造储层解释等三方面内容。其中三维 VSP AVA 属性参数反演内容中介绍了

包括三维 VSP 保幅处理、三维 VSP CDP 理论基础、三维 VSP 角度道集分解、Zoeppritz 方程及其简化理论、Zoeppritz 方程的 Aki – Richards 简化式和 AVA 处理所获得的各种属性剖面及其解释意义等方面进行论述，并进行模型测试和在垦 71 井区中的应用情况；构造储层解释包含有层位标定、与高精度地面地震对比解释、断层解释以及测井约束地震反演等方面内容。

第二章 VSP 采集装备

进行 VSP 采集工作的硬件设备包括井下仪器、记录仪器、电缆绞车、震源和辅助设备等，图 2.1 为 VSP 测井现场。下面将分别介绍震源、井下检波器以及地面记录仪器等。

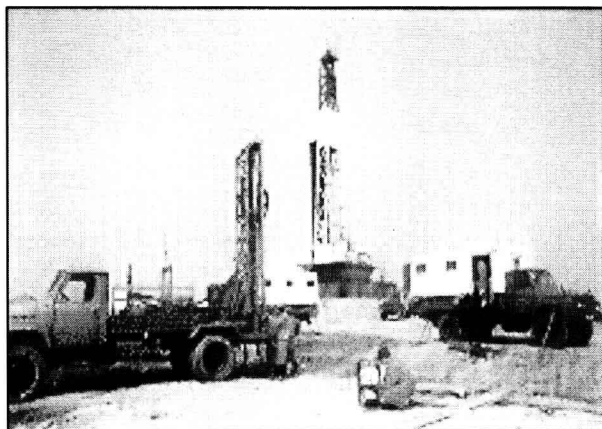


图 2.1 VSP 测井现场

2.1 震 源

2.1.1 三维 VSP 对震源的要求

- (1) 震源频带宽，具有丰富的高频成分；
- (2) 具有足够的为测量地下地质目标层所需的能量；
- (3) 具有良好且稳定的震源子波，即震源子波的一致性要好；
- (4) 与震源有关的干扰尽量少；
- (5) 震源类型、组合方式及各种参数选取要合理。

2.1.2 VSP 震源类型

VSP 震源类型分以下四种。

(1) 炸药震源：采用可重复性的炸药震源，需支架、套管、井壁与套管间固水泥、小药包 (0.1 ~ 0.5 kg)，并在潜水面以下激发；(2) 空气枪、蒸汽枪、水枪震源：用于海洋，操作简便，但能量较弱，常采用组合或叠加方法；(3) 电火花震源：利用在液体中瞬间放电方法产生高温高压脉冲；(4) 可控震源：节省人力物力，提高生产效力，是理想的 VSP 震源。