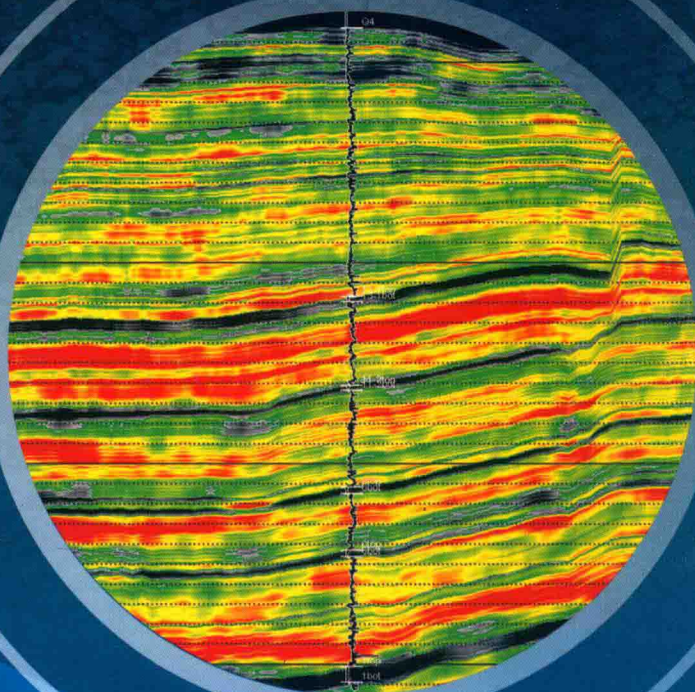


煤田 3D3C 地震勘探研究

——以淮南顾桥煤矿为例

芦俊 王赞 陈开远 等著



地质出版社

煤田 3D3C 地震勘探研究

——以淮南顾桥煤矿为例

芦俊 王赞 陈开远 等著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书首先对3D3C地震技术研究现状进行了分析,然后结合淮南顾桥煤矿的勘探实例,介绍了煤田3D3C地震勘探的主要技术环节与应用效果。煤田3D3C地震主要包括采集设计、数据处理、解释反演、物性预测四大技术环节。书中对这四大技术环节所包含的主要方法的基本原理与应用效果进行了详细阐述,其中煤田3D3C地震采集设计主要基于淮南顾桥煤田的地震地质模型,开展数值模拟分析,对最佳接收窗口等采集参数进行优化;数据处理采用共散射点道集的干涉叠加进行转换波的成像,纵波数据成像采用了叠前时间偏移方法,在处理的过程中重点考虑了保幅与提高分辨率;解释与反演部分重点介绍多波联合构造解释的原则与应用效果,包括采用多波联合反演技术进行岩性的解释;物性预测则基于多波联合反演得到的属性参数、岩石物理实验、测井数据以及岩电测试的结果,对孔、缝、渗、饱和度参数及孔、缝的含水性以及瓦斯富集进行了预测。最后对整个煤田3D3C地震勘探技术在淮南煤矿的应用情况进行了总结与分析。

本书可供从事3D3C地震勘探及地震各向异性研究人员以及相关专业的大学生、研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤田3D3C地震勘探研究:以淮南顾桥煤矿为例/芦俊等著. —北京:地质出版社,2011.12
ISBN 978-7-116-07477-4

I. ①煤… II. ①芦… III. ①三维地震法—应用—煤田地质—地质勘探—研究—淮南市 IV. ①P618.110.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第246421号

Meitian 3D3C Dizhen Kantan Yanjiu

责任编辑:祁向雷 李丛蔚

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010) 82324519(办公室);(010) 82324577(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京天成印务有限责任公司

开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:9.5

字 数:220千字

印 数:1—600册

版 次:2011年12月北京第1版

印 次:2011年12月北京第1次印刷

定 价:30.00元

书 号:ISBN 978-7-116-07477-4

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

煤炭在国民经济和社会发展中具有重要的战略地位,新中国成立 50 多年来,煤炭在一次能源生产和消费结构中一直占 70% 左右,是主体能源,并且在未来相当长的时期内不会改变。但我国煤田地质条件复杂,成煤条件的多样性、构造变动的多幕性和复杂性等因素使得我国的煤炭开采面临严重的动力地质灾害,开采难度大。

随着煤矿开采的高度现代化,查清煤炭资源的开采地质条件,为矿井的设计、建设和生产,提供更加精细可靠的地质资料和数据,以便采取有效技术手段和措施,避免和减少灾害的发生,是实现矿井安全高效生产的重要保障,也是实现以人为本、构建和谐国家目标的需求。随着煤炭开采的大规模进行,煤田勘探变得越来越重要;尤其在三维地震技术引进到煤田领域后,促进了煤田勘探技术的质的飞跃。

20 多年来,三维地震勘探技术一方面为煤炭的高产高效开采提供了基本的技术保障,同时,地震方法技术在煤田的应用、实践中也不断的丰富、发展、完善;另一方面,三维地震勘探技术在煤田勘探领域也越来越受到更大的挑战。随着开采深度的加大,高地温、地压、瓦斯等地质灾害成为煤炭开采不可回避的关键问题和效益提高的制约因素。除常规构造外,煤矿的探采提出了更高的要求,例如,要能够预测煤层顶底板的岩性及其横向相变,还要提供地下应力场的分布特征指导巷道的布设和支护,煤系地层中的裂缝发育程度、水与瓦斯的赋存状态都是地震探测技术必须解决的问题。

三维三分量(3D3C)地震勘探技术是近几年在地震各向异性理论框架下,在常规纵波三维地震勘探技术基础上发展起来的一种新的地震探测方法。同常规地震勘探相比,3D3C 地震技术同时研究纵波与转换横波波场,在构造解释和储层预测等方面,将比只用单一纵波的可能性更大、可靠性更高。目前 3D3C 地震勘探的理论方法相对成熟、处理解释技术成形;而且其投资费用仅是常规勘探 1.3 倍,但提供的地质信息却是常规地震勘探的至少 3 倍。它在理论、模型上的先进性,在小范围应用中所展现的超过常规三维地震勘探技术的优势,使得它引起世界各国科研人员的广泛关注和极大的研究热情。

目前 3D3C 地震勘探技术已经在油气田勘探中得到一定程度的应用,尤其是 2004 年,中石化在川西新场地区深层致密砂岩气藏的 3D3C 地震勘探技术的成功应用预示着 3D3C 地震勘探技术正向着工业化目标迈进。就煤田 3D3C 地震勘探而言,煤层具有厚度薄、波阻抗低、各向异性程度较强等特点,3m 以下小断层的解释、煤层顶底板的岩性识别、含水性以及瓦斯含量预测等问题是煤田 3D3C 地震勘探更加关注的地质目标。但煤层也具备埋深浅、第一手资料信噪比高、目的层波组特征明显、纵波和转换横波易于识别和对比等特点,我们有理由相信,3D3C 技术的应用研究首先从煤田上取得突破是有可能的。

两淮煤矿既是国家的重点煤矿，也是地质情况最复杂、最具代表性的煤矿。在两淮煤矿开展地震勘探新技术的研究既具有挑战性，又具有应用的广泛性和代表性，容易获得技术的更大进步。近几年来，淮南矿务局一直重视煤田地震技术的发展与革新，与科研院所以及高校联合，开展了多次 3D3C 地震勘探的试验研究。本书结合淮南顾桥煤矿的勘探实例，较为全面的介绍了煤田 3D3C 地震勘探数据采集、处理、解释、反演的技术流程及其关键技术，并根据应用效果，客观的评价了煤田 3D3C 地震技术取得的进展与存在的问题，为煤田地震勘探技术的发展起到一定的推动作用，对正在兴起的煤层气勘探和即将兴起的页岩气勘探也具有明显的参考价值。



2011 年 10 月

前 言

煤炭是我国重要的基础能源和原料，在国民经济中具有重要的战略地位。在我国一次性能源结构中，目前乃至以后长期煤炭将是我国的主要能源。当前我国煤炭开采主要遵循高产高效的开采原则，在矿井的建设和生产过程中，工作面的合理布置、综采机组高效高产的发挥，以及矿工和整个矿井的安全等都依赖于矿井地质构造的查明程度。而且，煤炭生产多是地下开采，这决定了煤炭自然资源条件对煤炭安全成本具有极大的影响。一般来讲，地质构造、煤层发育情况、地下水文地质以及瓦斯赋存状况等煤炭自然资源赋存条件的不同，对高产高效与安全生产的影响也就有所不同，因此，要保证煤炭生产安全、高产高效开采，就必须查明地下包括裂缝在内的小构造，以及地下水、瓦斯赋存等状况。

目前，常规的纵波地震勘探技术已经日臻成熟，成为主要的煤田地质勘探手段。虽然在地震地质条件较好的地区，基本可以查明落差 10m 左右的断层，控制煤层的基本形态，但仍不能满足煤矿综采对地质资料精度的要求。为了有效地预测瓦斯的富集部位，保障安全生产，煤矿要求查明落差 3m 左右的小断层，甚至 1m 左右的小断层或破碎带也是煤田地质勘查需要解决的目标。综上所述，为了保证高产高效煤炭开采的安全生产，研究新的地震勘探施工、处理和解释技术，改进老的技术方法，提高技术水平和解释精度，仍是我国煤炭工业生产的迫切需要。

随着三分量检波器的出现，三维三分量（3-dimensional 3-component, 3D3C）地震勘探技术应用日益广泛。与常规三维地震勘探相比，3D3C 地震勘探建立在地震各向异性的物理基础之上，比常规三维地震勘探各向同性的理论假设更贴近实际，可同时研究纵波和转换横波，帮助进一步识别地下小构造；能够提供更加丰富的地震属性信息，利用这些属性参数可反演地层岩性、孔隙度、裂隙及其含流体性等信息；有利于更精确地确定煤层的几何与物性特征，是国内外地震勘探研究的热点，也是地震勘探的发展方向。

煤田 3D3C 地震数据的综合解释利用多波多分量资料中含有的丰富地震信息，可以较全面地反映地下介质弹性物性特征，有望解决单一纵波难以描述的岩性、瓦斯分布及裂隙发育等各向异性地质问题，从而成为煤田综合地球物理技术的一个重要组成部分。准确探明煤层构造和煤厚展布情况，提前预测开采煤层工作面上的破碎带、裂隙带以及瓦斯富集区，对煤炭生产中工作面的合理布置、巷道维护、突水和瓦斯突出等安全防护工作有着重要的指导意义；它不仅降低了巷道支护成本，还为矿井的安全生产提供了地质保障，从而真正实现了煤炭高产高效安全生产。

长期以来，淮南矿务局一直重视多分量地震技术在煤田的推广应用。作者所在的课题组有幸在淮南矿务局的资助下开展了地面 3D3C 地震勘探以及与之相关的煤田测井的研究工作。勘探技术的实施过程中，在煤田 3D3C 地震勘探技术方面获得一些新的认识，取得了一定的创新性研究成果，同时也发现了一些问题。因此，特将其中的主要技术方法与应用效果进行整理，对煤田 3D3C 地震勘探的关键技术、目前取得的进展以及存在的问题和攻关方向几个方面进行总结与论述，与大家共同探讨。

本书首先介绍 3D3C 地震勘探技术的发展现状,对存在的问题进行了剖析;然后结合淮南顾桥煤矿的勘探实例介绍 3D3C 地震采集、处理、解释反演以及储层预测的主要技术方法。本书共分 5 章,其中王赟研究员主要负责绪论与第一章、第五章的编写,尹军杰博士参与第一章的编写工作;陈开远教授完成第三章的编写,贾曙光工程师参与了第三章纵波井震联合反演方法与流程的编写工作;于光明博士参与了第二章常规纵波处理的编写工作,其余内容由芦俊博士完成。下面对各章做一一概述。

绪论:主要介绍了 3D3C 地震勘探技术的发展现状与存在的问题。

第一章:介绍煤田 3D3C 地震数据采集设计方法。主要介绍了基于数值模拟分析的最佳接收窗口的确定、采集参数设计与试验等内容。

第二章:介绍煤田 3D3C 地震数据的处理方法。分别介绍了纵波与转换波的处理难点与关键处理技术,重点阐述了自行研发的转换波处理模块的原理与应用效果。

第三章:介绍煤田 3D3C 地震数据的解释与反演方法。分别介绍了纵波与多波的解释方法与成果,重点阐述了多波联合解释的理论依据、联合反演方法以及属性参数的组合与解释。

第四章:介绍含煤地层的多波预测方法。分别阐述含煤地层的孔、渗、饱参数、含水性、裂缝发育以及煤层瓦斯富集的预测方法与应用效果。

第五章:对淮南顾桥煤矿 3D3C 地震数据采集、处理、解释反演以及物性预测 4 个方面的技术流程进行总结,剖析存在的问题,并提出改进的建议。

本书是结合作者近年来在煤田 3D3C 地震勘探方面积累的研究成果撰写而成的。在这里首先要感谢淮南矿业集团对项目的支持,尤其是吕琳与赵伟两位专家对 3D3C 地震技术的研究提出了十分具体和有意义的建议;其次要感谢中国地质大学(北京)能源学院的樊太亮教授等对研究工作的关注与鼓励,感谢中国科学院地质与地球物理研究所滕吉文与姚振兴院士一直以来对多波地震技术研究的关注与大力支持;最后要感谢李文慧、邢春颖和研究组的各位师兄弟姐妹们在煤田 3D3C 地震技术与本书完成中所给予的无私帮助,感谢本书中所引用著作及学术成果的前辈及同行们。

本书的撰写得到中央高校基本科研业务费专项资金(2011YYL043)、中国石油科技创新基金项目(2011D-5006-0303)、国家自然科学基金项目(41104084)以及“十二五”油气与煤层气重大专项(2011ZX05035-001-006HZ, 2011ZX05035-003-006HZ, 2011ZX05008-006-022)的联合资助。

由于作者水平有限,错误之处在所难免,期望读者和同行给予指正。

作者
2011 年 10 月

目 录

绪论	1
1 煤田 3D3C 地震数据采集	8
1.1 试验区概况	8
1.2 地质概况	9
1.2.1 构造	9
1.2.2 地层	9
1.2.3 煤层	9
1.3 勘探目标与地震部署	11
1.4 地震地质条件分析	12
1.4.1 勘探目标分析	12
1.4.2 浅层地震地质条件分析	12
1.4.3 深层地震地质条件分析	12
1.5 地震地质建模	13
1.6 数值模拟分析与采集建议	15
1.6.1 最佳接收窗的确定	15
1.6.2 黏弹性各向异性的模拟分析	19
1.6.3 裂缝波场的模拟与接收	22
1.7 主要采集参数试验	26
1.7.1 主要试验内容	26
1.7.2 试验资料分析方法	26
1.7.3 试验资料分析及效果评价	26
1.7.4 3D3C 地震采集观测系统及主要参数	32
1.7.5 试验区采集工作量与质量初评	33
2 3D3C 地震数据处理	34
2.1 常规 P 波处理	35
2.1.1 难点分析	35
2.1.2 处理流程及关键处理技术	35
2.2 转换波处理	40

2.2.1	难点分析	40
2.2.2	处理流程与关键处理技术	41
3	多波地震数据解释与反演	55
3.1	常规纵波解释	55
3.1.1	资料分析	55
3.1.2	纵波资料精细解释	58
3.2	常规纵波的井震联合反演	69
3.3	纵波解释成果	70
3.3.1	褶曲和断层	71
3.3.2	煤层速度特征	74
3.3.3	煤层厚度	75
3.4	多波联合构造解释	79
3.4.1	PP波与PS波的层位标定	79
3.4.2	PP波与PS波对比解释小构造	80
3.5	PP波与PS波联合反演	86
3.6	属性参数的组合	91
3.6.1	LMR属性参数	91
3.6.2	纵横波速度比	93
3.6.3	泊松比	94
4	含煤地层物性的定量预测	96
4.1	孔隙度、渗透率、含水饱和度的预测	96
4.1.1	孔隙度预测	96
4.1.2	渗透率预测	99
4.1.3	含水饱和度预测	100
4.2	地下水发育情况定量预测	102
4.2.1	含水量的计算方法	103
4.2.2	第四系底裂隙含水性分析	104
4.2.3	13-1煤及其顶、底板含水性分析	104
4.2.4	11-2煤及其顶、底板含水性分析	105
4.2.5	8煤及其顶、底板含水性分析	106
4.2.6	1煤底与1灰间的导水性分析	107
4.3	裂隙发育预测	108
4.3.1	横波分裂检测裂隙原理	108

4.4 瓦斯富集程度预测	114
4.4.1 瓦斯含量及成分的分布规律	114
4.4.2 瓦斯含量与深度的关系	114
4.4.3 地温	116
4.4.4 试验区钻孔控制瓦斯含量	118
4.4.5 基于 3D3C 地震数据的 Langmuir 计算方法	124
5 存在的问题及总结	129
5.1 地震数据采集	129
5.1.1 总结	129
5.1.2 存在问题	129
5.1.3 建议	130
5.2 数据处理	130
5.2.1 总结	130
5.2.2 存在问题	131
5.2.3 建议	131
5.3 解释反演与物性预测	131
5.3.1 总结	131
5.3.2 存在问题	135
5.3.3 建议	135
参考文献	136

绪 论

近几年,通过产业部门与科研院所的联合攻关,基于地震各向异性理论的 3D3C 地震勘探技术在中国已取得长足进展,并在解决岩性、裂缝油气藏等复杂勘探问题方面表现出良好的应用效果与发展前景。对于煤炭资源来说,煤层不同于一般的油气储层,它具有埋藏浅、厚度薄、波阻抗差别大、裂隙发育程度高等特点,开展 3D3C 地震勘探有助于提高目标煤层的勘探精度,并且煤田 3D3C 地震数据具有信噪比高、目的层波组特征明显、纵波与转换波易于识别对比等特点,所以多分量转换波地震技术的应用研究从煤田上取得突破是有可能的。

淮南矿务局一直重视 3D3C 地震技术的推广应用,在顾桥、谢桥等多个矿区与科研院所以及高校合作开展了 3D3C、多分量 VSP 以及耦极子横波测井的研究工作,大大推动了地震各向异性理论与 3D3C 地震技术在煤田领域的应用进程。本书的撰写结合淮南顾桥煤矿的 3D3C 地震勘探实例,介绍煤田 3D3C 地震勘探的主要技术与应用效果,剖析了各个环节存在的难点以及存在的问题,并对发展方向做出展望。

1. 3D3C 地震勘探技术的研究意义

长期以来,传统的地震勘探技术只利用了纵波信息,以解决构造问题为主要目标;但随着油气、煤层气勘探开发程度的不断提高,面临的问题也更加复杂。目前,大型的常规油气藏已越来越少,很多老油田已相继进入开发的中后期;随着我国经济的快速持续发展,油气消费的对外依存度已超过 50%,严重影响我国经济社会发展的安全。同时,我国油气平均探明率只有 29%,远低于国际 64% 的平均水平。但伴随着我国油气 60 年的开发历程,剩余油气资源的勘探开发难度越来越大。据不完全统计,我国目前及未来几十年中,主要油气储量来自非常规的裂缝储层,约占储层类型的 60% 以上。因此加大我国非常规油气藏,例如致密砂岩气、煤层气与页岩气等的勘探开发力度成为当务之急和战略方向。

以往我们通过常规纵波地震技术,结合钻孔和地球物理测井实现储层预测和流体识别,所基于的理论基础为均匀各向同性声学介质理论和以孔隙为主要研究对象的双相介质地震波理论。但是,由于常规地震勘探只利用了单一的纵波,从而使得地球物理反演的多解性较强,预测精度受到挑战。面对非常规的裂缝性储层及其流体的识别和预测,裂缝诱导了较强的地震各向异性,现有的地震勘探理论与方法均存在明显的不足,急需开展与之配套的地震勘探技术的研究。

多分量地震勘探能够同时获得纵波与转换横波资料,既包含了地下的构造信息,又能反映裂缝等各向异性信息以及流体特性,因而适用于非常规油气藏勘探的勘探与开发。20 世纪 90 年代中后期,海上转换波地震技术的成功采集使多分量地震勘探进入了发展高潮,并从方法研究阶段开始转入工业化试验与应用阶段。在此过程中,国外一些科研机构,如英国地质调查局、加拿大的 Calgary 大学与美国 Colorado 大学在多分量地震技术的理论研究、实际应用方面积累了一些成果与成功的经验,大大推动了多分量地震技术的工业化进

程。在国内,多波多分量地震技术研究起步稍晚于国外,从“七五”至“十一五”,多分量地震技术一直备受关注。国内各大石油公司与煤矿企业联合高校、科研院所进行了大量技术攻关,胜利、大庆、开滦、淮南、新疆、四川、长庆等油田与煤矿企业相继开展了多分量地震试验与生产,有很多成功的例子,并在多分量地震数据采集、处理、解释反演的一些关键技术上有所突破。

但是,多波多分量地震技术在发展中存在的问题也是显而易见的,其中最显著的问题在于两个方面:①地震数据的处理与后续的储层预测脱节,这也是多波多分量地震技术目前难以大规模工业化应用的最主要原因。在过去的十几年中,地球物理工作者往往更多地关心如何利用多波多分量地震数据进行高精度的成像,常常忽视了对多波储层预测技术的研究,这导致了多波多分量地震技术难以与更深入的地质问题挂钩。②多波多分量地震勘探缺乏与之配套的工业化软件,这使得多波多分量地震数据的处理以及储层预测的效率和难以满足精细勘探生产的需求。目前,此类软件系统的研发还只停留在个别处理模块的研究上,这种现状严重制约了多波多分量地震技术的工业化进程。在缺乏配套软件系统的情况下,3D3C地震数据的解译常被套用纵波的思路来实现,虽然有时也能够让多分量地震数据在一定程度上较好地成像并用于解释,但是由于纵波处理与解释手段无法保持矢量波场特性,这使得后续的多波储层预测无法获得可靠的属性参数,也导致多分量地震技术失去其应有的“光辉”。本书针对3D3C地震数据的特点,开展了针对性研究,结合作者所在研究小组近几年的科研成果,对煤田3D3C地震勘探技术进行介绍。

2. 3D3C地震采集技术研究现状

(1) 数字三分量检波器的研制

采集仪器的进步是近几年多分量地震技术向前发展的根本原因之一;尤其是自21世纪初, I/O 和 CGG 等地球物理服务公司研发出微电子机械系统(MEMS)数字检波器,代替了传统的数模模拟检波器,提高了陆上多分量地震资料的分辨率与信噪比,也极大地降低了多分量地震采集成本。国内的石油公司也大量进口数字三分量检波器,进行多分量地震勘探试验与生产。2003年中石油在长庆苏里格气田的3D3C采集以及2004年中石化分别在胜利和四川的3D3C采集都采用了先进的数字三分量采集系统。2006年,淮南矿业集团在顾桥矿区进行了数字三分量煤田地震勘探。这些试验与生产项目的实施为转换波3D3C资料处理和解释研究及推动三分量地震技术进步打下了良好的基础。

国内一些机构还开展了数字三分量检波器的研制。中国矿业大学(北京)发明了一种智能三分量地震检波器,实现了数字化、智能化,在多波工程勘察、煤田地震勘探、矿井超前探测等领域进行了初步应用。中石油BGP、中石化南京物探技术研究院与吉林大学、中国科学院地质与地球物理研究所都在三分量地震勘探检波器的研制方面做出很多努力,但目前正在野外试验中,尚未普及并应用于生产。

(2) 多分量观测系统设计

多分量地震采集的目标波场是各向异性的矢量波场,其观测系统的设计也必须基于地层各向异性,采用点源激发、单点接收,以尽可能高保真记录各向异性的地震波场,避免组合对各向异性的压制;同时兼顾方位角以及纵波、转换波的最佳接收窗口。目前,一些专业软件已能够实现多分量野外观测系统的设计,并与SEG标准接轨,且广泛应用于生产实践。但是这些软件的设计基本是基于各向同性的射线理论,没有真正实现基于各向异

性的观测系统设计,而各向异性的存在会导致采集参数发生很大的偏差。

多分量观测系统设计还有很大的发展空间,有很多问题值得地震勘探研究人员进行深入的思考。大规模的全方位角、长排列和小道距的三维多分量地震采集的花费是巨大的,产业部门在这方面的投入还是小心谨慎的。很多情况下,如何设计一条二维的,或者交叉型多分量测线,对地下的各向异性进行初步探查显得更加重要。另外,由于地下介质存在黏弹性,如巨厚第四系覆盖层、煤系地层、油气储集层等,目的层的反射波(尤其是转换波)在到达地表时表现为较低的频率,往往难以为后续的解释、反演提供可靠的数据来源。多分量的观测系统设计更应充分考虑频率的衰减问题,以便于确定最佳的采集参数。

(3) 多波低速带调查

纵波的低速带调查技术已相对成熟,常采用微测井与小折射法;但为多分量地震勘探服务的低速带调查是个新的课题,目前没有成熟的方法可以借鉴。国内研究较多的多波低速带调查方法有横波微测井、VSP三分量微测井以及三分量小折射。微测井需要用到井下三分量检波器与横波震源。纵波微测井的解释方法可以套用到横波微测井数据的解释中,能够提供较为精确的浅层横波速度结构,在多分量地震采集中用得较多。三分量小折射利用纵、横波初至反演近地表的纵、横波速度结构。纵波的初至到达时最早,能量强,相对容易识别;但是当浅层分层较多时,横波的初至往往淹没在复杂的纵波广角反射内,难以拾取。该技术的突破取决于波场分离算法,目前仍处于研究阶段,尚未得到推广。

很多情况下,利用微测井和小折射方法进行多分量地震低速带调查不能满足勘探的需求。一些地区,如淮南矿区、华北平原、西部的沙漠地区,第四系松散覆盖层较厚,横向速度变化大,利用微测井和小折射方法不能完全确定低速带的变化,高密度的微测井和小折射调查也大大增加了勘探的成本,因此人们不得不探索其他可能的低速带调查方法。近几年来,炮集记录中瑞雷波信息的提取和利用在多分量转换波研究中备受关注,并有一些成功的事例。但这种方法也只能应用在面波发育的地区,在苏里格气田,由于面波不发育,就难以应用这种方法。

(4) 存在问题

三分量检波器与采集方法理论的提高在一定程度上促进了多分量地震技术的发展,但是多分量地震的目的是精细的构造与物性探查和流体识别,因此比常规纵波勘探要求更加精确,数据采集的质量要求更高。纵观国内多分量地震的应用效果,发现地震采集中依然存在一些较为严重的问题:①采集质量监控系统不完善;检波器的埋置、激发药量、井深等的人为因素影响较大,没有一个量化的标准来判定其好与坏。即目前国内尚没有一套用于转换波的现场处理、分析与监控软件。②同一试验区很少同步采集三分量VSP资料 and 全波列声波测井资料,导致后续的处理解释中波场标定难以进行。③低速带调查精度、密度低,难以为后续的转换波静校正提供精确的纵、横波表层速度结构。④单点采集方式造成了多分量地震资料的信噪比较低,且由于后续处理中压制面波的要求完全不同于常规纵波资料,因此单点无组合多分量地震数据的采集难度更大,对我国的陆上勘探尤其如此。

3. 3D3C地震数据处理的研究现状

多分量地震数据的处理是多分量地震勘探的关键,其目标就是高精度的多波成像与物

性预测。近几年,国内外学者在这方面的研究成果较多,推出的处理模块基本达到实际应用的水准;它的突破也使得多分量地震向工业化应用迈进了一大步。转换波的处理是多分量地震数据处理的核心,其主要难点有:多分量地震数据的保幅、保低频叠前去噪,转换波静校正、共转换点抽道集,速度分析和动校正的联动、叠前偏移等。

(1) 多分量地震数据的叠前去噪

目前用得最多的处理思路还是将转换波与纵波分别输入常规纵波处理系统,利用有效信号与噪音的频率特性、视速度特性、同相轴时距特性、相干特性等的不同实现噪音与有效信号进行分离。这种处理方法对纵波无疑是十分有效的,但是对转换波来说,无论是频带还是视速度范围都与面波等线性干扰重叠太多,常规纵波的去噪方法必然会导致有效信号的大量破坏。利用多分量数据的特点发展出来的矢量去噪技术成为多分量叠前去噪的有效技术,研究较多的方法有:极化滤波、矢量分解去噪、减去法去噪等。这些方法一般要求采集的地震数据较好的保持了地震波的矢量特性,利用纵波、横波、面波、随机噪音的不同振动方向、轨迹来实现波场的分离。

(2) 转换波静校正

由于地表与浅层横波速度未知,检波点的横波长波长静校正是转换波静校正的难点。目前一般采用统计的方法,即短波长静校正量的互相关算法来近似替代。当地下构造平缓时,共接收点叠加道集相干算法是一种常用的方法;但是当近地表结构较为复杂时,该方法效果欠佳。马昭军等提出一种切实可行的转换波静校正方法,即根据多分量微测井资料求取低速层纵、横波平均速度比,利用纵波检波点静校正量和该速度比来求取转换波长波长静校正量,获得较好的效果。近几年利用瑞雷面波反演进行转换波静校正的研究较多,并获得了初步效果,其思路与马昭军提出的方法类似。不同处在于后者利用炮集记录的瑞雷面波反演获得近地表的横波速度结构,不需要增加野外工作量。

(3) 共反射点叠加成像

转换波的上、下行波的不对称性,使得常规的基于共中心点(CMP)道集的速度分析、动校正和水平叠加技术不能适用于转换波,转换波成像必须研究新的方法。转换波共转换点道集成像包括:共转换点抽道集、非双曲速度分析、动校叠加与叠后偏移,其中共转换点抽道集与速度分析和动校正的联动是核心技术。国际上研究共转换点抽道集技术,总体上可分为两条思路:①在水平层状假设下,对单一均匀水平层状模型导出的一元四次方程进行求解,获得精确的(或近似的)转换点的坐标;比较有代表性的成果有 Tessmer et al. (1988) 的精确解析解,李录明等(1997)的分层 CCL 迭代法求解,Thomsen (1999) 的各向异性近似解,许士勇等(2002)的二阶近似解等;②在倾斜地层假设下,对三维倾角转换波共转换点坐标进行求解,抽取倾角 CCP 道集,并同步实现转换波 DMO;姚陈等(2005)给出了三维倾角转换波共转换点的解析表达式,使得抽取共转换点道集的精度提高了一个台阶;于光明等(2007)将该方法应用于实际数据,获得较好的效果。

(4) 叠前偏移成像

转换波叠前偏移包括时间偏移与深度偏移。转换波叠前时间偏移可以替代 CCP 抽道集、DMO、叠后时间偏移等时间域处理流程,可使成像效果明显提高。转换波叠前时间偏移技术的发展历程不长,但是现在已发展到各向同性和各向异性两种偏移方法。转换波各向同性偏移方法主要有:等效偏移距法、虚拟偏移距法、共炮点记录叠前相移偏移等方

法。Bancroft 最早提出等效偏移距 (EOM) 叠前时间偏移方法。该方法建立在 Kirchhoff 叠前时间偏移基础上,其主要特点是抽取共等效偏移距散射点道集。虚拟偏移距法是 Wang 等 (2001) 在 EOM 的基础上重新引入虚拟偏移距 (POM), 实现方法与 EOM 类似,但是该方法对速度的依赖性更小。转换波共炮点记录叠前相移法偏移是以相移法为基础,主要求出相移时间,针对 PSV 波射线路径的非对称性,波场延拓时,用纵波速度进行正向延拓,反向延拓时用横波速度;每外推一个延拓步长时,用互相关成像法。转换波各向异性叠前时间偏移主要有:精确旅行时各向异性叠前时间偏移、各向异性双平方根方程叠前时间偏移、LXY 改进型双平方根方程叠前时间偏移。其实现过程一般分为两步:第一步,在 ACP 道集上通过 4 参数速度分析获得速度与等效各向异性参数模型;第二步,完成叠前各向异性 Kirchhoff 时间偏移。目前该技术还只发展到 VTI 介质水平,其他更复杂介质的各向异性偏移虽有研究,尚未见到较好的应用效果。

转换波叠前深度偏移能够适应更为复杂的地质情况,利用地层深度的唯一性特点对转换波在深度域进行成像,有利于提高成像的精度,更有利于后续的多分量对比解释。王妙月等 (1988) 在 20 世纪 80 年代后期开展了弹性波 Kirchhoff 叠前深度偏移技术研究,能够实现 Z-X-Y 三分量数据的同时偏移。这项技术在胜利油田、塔里木轮南、大庆汪家屯地区的多分量转换波地震勘探中得到试验应用。纵波与转换横波虽然在时间域走时不同,但在深度域便于地质信息的对比,且偏移显示较好的层位与构造对应。李录明 (1998) 发展了傅立叶有限差分转换波叠前深度偏移技术,获得较好的应用效果。人们对转换波叠前深度偏移的期望值是很高的,但是很少能从文献上看到较好的转换波叠前深度偏移剖面。其原因是转换波叠前深度偏移的效果很大程度上取决于纵、横波速度模型的精度,而高精度横波速度的深度域建模技术难以突破一直都是制约转换波叠前深度偏移技术实用化的瓶颈,且转换波叠前深度偏移技术的处理周期长、费用高,目前在勘探中应用程度不高。

(5) 其他成像方法

为了解决转换波传播路径的不对称,目前国际上有一些学者提出将转换波剖面进行一些转换,用传播路径对称的等效波场来代替。Grechka 和 Tsvankin (2002) 提出用纵波与转换波计算横波的旅行时,从不同道集的转换波与纵波的旅行时中提取等效的横波旅行时,从而构建横波记录,再用处理纵波的方法处理横波。这种方法无需速度信息与各向异性参数即可获得横波的传播时间,解决了转换波传播路径的不对称导致成像的困难,容易直接获得横波信息。这种方法的缺点是要求地震记录有足够的时间长度,转换波反射系数与横波反射系数存在差异,最终得到的横波振幅是不精确的。Miao (2007) 提出了一种无需依赖纵波的转换波叠前时间偏移技术,充分考虑了地层的等效各向异性参数,在多分量地震勘探中获得较好的应用效果。

(6) 存在问题

总体看来,国际上对转换波成像的研究的出发点是如何解决转换波射线路径的不对称问题。国内在转换波成像上并不落后于国外,在有些算法的研究上甚至是超前的。但每种方法都有其优缺点,目前这些成像算法的商业化程度都还不高,需要进一步的完善。

目前的多分量地震数据处理方法大多尚未考虑地层的各向异性,导致很多各向异性信息在处理环节就被抹杀了,从而造成裂缝探测的不确定性。转换波的处理环节还有很多难

点需要去攻克,如基于各向异性的波场分离、各向异性反 Q 滤波等。

4. 3D3C 地震数据解释的研究现状

在 3D3C 地震数据采集和处理技术日益成熟的今天,对多分量地震数据的解释不仅仅只追求构造的精细描述。在多波反演技术的辅助下,已逐步向岩性反演、流体描述和缝洞描述以及地下介质各向异性解释等方面迈进了一大步。但是,相对多分量地震数据的采集、处理而言,多分量地震数据的解释是落后的,致使产业界难以看到这一技术的优越性,不敢大规模地投入使用。产生这一状况的主要原因是:对多分量转换波的解释不完善、不定量、不系统;没有充分利用多分量地震信号中蕴藏的丰富信息;没有提供地下地质模型准确、精细、实用的信息;缺少地球物理理论、参数分析与地质模型间有效连接桥梁,尤其在多分量地震数据与测井数据联合反演和 AVO (AVA) 研究方面还有很多问题值得理论方法上的深入探讨。

(1) 多波层位标定

PP 波与 PS 波层位对比是多波解释的基础,也是难点所在。全波列测井合成记录层位标定法与三分量 VSP 层位标定法是国际上普遍采用的多波层位对比方法。在没有这些井数据时,层位的对比难度较大,同一地层的 PP 与 PS 反射波同相轴往往存在较大的差异,极性的正负对应没有统一标准,直接的层位对比存在困难。Lawton (1992) 提出在没有全波列测井和三分量 VSP 数据时,利用纵波测井资料与用户输入的纵横波速度比,模拟一定炮检距的 PP 与 PS 波合成记录,进行层位对比。当没有纵波测井数据或层位反射离井位较远时,Gaiser 提出用叠后局部标定的方法解决多波反射层位的匹配问题。贺振华等较系统地总结了多波层位识别的主要原则和方法,提出了多波层位对比五大原则。但是,无井标定的结果始终是缺乏可靠性。

(2) 多分量构造解释

在油气田多分量地震勘探中,转换波常用来对气云带或 P 波弱阻抗差界面成像。但是由于转换横波较低的主频,转换波识别小断层的能力常受到人们的质疑。如何综合利用纵波和转换波对比综合判识、预测小构造是一个难题。PP 波构造解释思路照搬到 PS 波上不再适用,用 PS 波解释小构造必须基于地震各向异性理论。P 波与 S 波都属于应力波,P 波传播与偏振主要受到地层的压应力(重力)影响较大;S 波传播与偏振主要受到地层的水平构造应力影响较大,并在应力的非连续面产生横波分裂现象。小断层是区域构造应力存在的表现,断层附近是应力集中的区域,S 波偏振出现异常,表现在 S 波相位的异常,如相位反转或同相轴的不连续等,利用此现象可以综合判识小断层。因此,多分量地震数据的解释必须以 PP 波解释为主,再用 PS 波补充解释 PP 波上表现不明显的构造。石瑛等(2008)利用转换波数据解释出 1.8m 的小断层。

(3) PP 波与 PS 波联合反演

PP 波与 PS 波联合反演主要包括两种方法:叠前 AVO 反演与叠后反演。Stewart (1990) 首先提出 PP 波与 PS 波联合 AVO 反演的方法。即假设介质的密度与纵波速度之间关系满足 Gardner 公式,对 Aki - Richard 公式进行修改,得到纵横波速度与反射系数之间的关系。随后他又将该方法实用化,对实际数据进行反演,验证该方法具有较好的稳定性。此后 Stewart (1995) 又提出了从 Aki-Richard 近似公式中提取弹性模量参数,更深入地研究岩石物理特性。国内在 PP 波与 PS 波联合反演方面的研究主要应用方面:中石

化新场气田通过 PP 波与 PS 波联合叠前 AVO 技术对储层参数进行反演, 获得较好效果。魏修成等 (2007) 提出在已知纵波层速度的情况下, 用速度扫描法求 Zoeppritz 方程组的数值解来反演横波层速度。这种方法是一种比较精确的横波层速度反演方法, 从方程的选择上避免了由于近似方程与精确解的误差造成反演结果的偏差。

多波联合反演可以直接得到纵、横波阻抗与密度参数, 其组合可以派生出更多的反映岩性与含流体性的属性参数, 例如速度比、泊松比等弹性模量和各向异性参数; 通过提取主要目的层的沿层切片, 可以对储层的岩性、含流体性进行定量描述。

(4) 多波联合物性预测

孔隙度、渗透率、含流体饱和度是描述储层物性的重要参数, 通过岩电参数实验与岩心测试, 可以建立多波属性与储层物性之间的联系, 进一步获得储层的物性参数。但是国内对这方面试验研究工作并不多, 在淮南顾桥煤矿利用多分量地震数据解释储层的物性参数可以认为是较为成功的一例。

(5) 裂缝检测

自 20 世纪 80 年代 Crampin 等提出并证实了裂隙诱导各向异性和横波分裂的存在并提出了 EDA (泛张各向异性) 模型以来, 国内外学者就裂隙介质的多波多分量地震响应开展了大量研究。Alford (1986) 提出用坐标旋转分析方法从地面多分量与 VSP 数据中提取裂缝信息, 该方法也是目前从多分量地震资料中解释地层各向异性信息用得最多的方法。Winterstein (1991) 提出在地层存在不同深度的多套裂隙系统时, 用剥层法进行横波分裂分析。但是剥层法的应用常常受到储层条件的限制, 如当目的层为薄层时, 顶底界面的快慢波时差往往难以提取; 另外静校正的误差导致了假的时移, 使得目的层的各向异性信息难以准确提取, 其中以发育裂缝的薄层的各向异性信息检测最为困难。大量的含裂缝薄层波场的理论数值模拟证明, 薄层的快慢波差异很少表现为时差的明显变化, 主要反映在振幅与频率特征上; 而各向同性薄层的反射系数同时受薄层厚度、入射角与频率的影响, 累加各向异性裂缝信息后波场更为复杂, 反演的参数增加, 不确定性增高。

5. 小结

多分量地震勘探技术是勘探地震学界近十年来最为重要的研究成果, 也是地震勘探技术的发展方向, 它为煤炭与油气、煤层气储集层的精细探测所带来的积极影响是显著的。纵观近十年来的研究成果, 很多算法在实际生产中得到了应用, 也能出现成效; 但是很多问题还亟待于尽快解决, 其中最重要的是应该首先建立多分量地震采集设计、监控、处理、解释反演一体化模式和软件系统, 并逐步向各向异性假设靠近。虽然目前在采集、处理、解释反演等方面还有很多不足, 但是我们相信, 只要产业界和科研院所继续紧密合作, 多分量地震技术的工业化应用不会久远。