

多波多分量地震勘探的现状与发展趋势

浙江省第一地质大队地质环境院 胡朝勇 朱明 修中标

[摘要]多波多分量地震勘探发展到今天经历了漫长的发展历程。因其可以获得丰富的数据信息,横波、转换波在产生、传播机制上独有的特点等诸多原因,使多波多分量地震勘探一次次成为研究的热点,同时,又因为投资、数据采集、处理、解释方面遇到一时难以解决的难题而又一次次沉寂下来。但近年来,随着各向异性理论、地震波传播机制、数值模拟、仪器生产、数据处理方法、解释理论等各方面取得的进展,多波多分量地震勘探再次成为科研生产的热点。本文回顾了多波多分量地震勘探的发展历程,介绍了研究应用现状,展望了今后的发展趋势。

[关键词]多波多分量 资料解释 研究现状 各向异性

1. 前言

多波多分量地震,又称全波地震,是指用纵/横波震源激发,利用三分量检波器记录地震纵波、横波(包括快、慢横波)/转换波,从而使野外记录的地震数据信息更为丰富,为地质构造的成像、裂隙和孔道的确定、储层岩性的解释等提供特定的信息。

同常规地震勘探相比,多波多分量地震勘探具有以下特点和优势:

①可以提取更多的物性参数信息,减少地球物理反问题的多解性。

②对比分析,可以提取更可靠的构造和岩性参数,确定储层特性,实现直接检测油气。

③在某些地区,纵波勘探无法得到好的记录,横波可以弥补。

④区别真假亮点。

⑤研究介质的各向异性。

尽管多波多分量地震勘探经历了一段不易的发展道路,尽管到目前为止,它还存在很多不可回避的缺点和不足,但由于具有常规地震方法所不具有的特殊优势,多波多分量地震勘探仍然是地震勘探的一个重要发展方向,具有广泛的应用前景。

2. 发展历程

多波(多分量)地震勘探的发展大约经历了3个阶段。

20世纪30年代,前苏联首先进行了横波勘探的研究和实践。美国也相继开展了相应的研究工作。其主要目的是试图利用横波传播速度低的特点,取得比纵波更高的分辨率。但在研究过程中遇到了很大的困难,同时发现因为横波频率较低,其分辨率的提高是有限的。因此,此时的横波勘探无法真正用于生产。

在沉寂了相当长的一段时间后,到20世纪70年代末多波地震勘探又一次成为研究热点,这主要得益于20世纪六七十年代纵波勘探的几项技术突破:多次覆盖、可控震源和数字地震技术等;同时在此期间也发明了实用的横波震源。在此期间,前苏联Ia.n6neпyH等人研究的多分量垂直地震剖面(VSP)技术也对多波勘探的发展有很大的促进作用。三分量VSP的成果不仅证实地下确有横波和转换波,而且能为多波勘探的野外采集、资料处理和解释提供重要的参数。从此,多波地震勘探开始进入了试验生产阶段,这一阶段利用多波的主要目的是要解决岩性油气藏的勘探开发问题。例如联合应用纵横波资料获取地下岩性参数、预测岩性和识别真假亮点等。这一时期的工作虽然取得了若干成功,但也存在不少问题,主要是多波勘探的花费要比纵波勘探高很多,而人们对多波资料的采集、处理和解释中的许多困难还没有很好的解决办法。特别是AVO等利用纵波资料解决岩性勘探开发问题的一些方法出现后,多波地震工作又趋于沉寂,因为这些方法解决岩性问题的精度虽然没有多波地震的高,但其花费要少得多。

在横波资料的解释中,人们发现不同方向横波测线资料的交点闭合差过大,其原因在于地层中的各向异性不能忽略,而横波对各向异性比较敏感,这也是多波勘探未能得到广泛推广应用的原因之一。Crampin等人研究发现,除岩石的层状结构可造成各向异性外,地下岩石中广泛存在的定向排列垂直裂隙也会产生各向异性。这种裂隙体系与油气的运移和储集有密切关系。因此,横波对各向异性的敏感不再是多波勘探发展的一种障碍,而是成为对油气勘探和油气田开发有重要价值和不可替代的新信息。故进入20世纪90年代以来,又一次掀起了多波勘探研究的热潮。然而,由于各向异性的复杂性,涉及的参数很多,在资料采集、处理和解释方面突破的难度都非常大。

正当陆上多波勘探处于停顿不前的境况时,海上多波勘探取得了飞速发展。海上多波勘探的困难主要在资料采集方面。20世纪90年代以来,海底多分量电缆(OBC)的出现使海上多波勘探发生了革命性的变化。OBC采集工作效率高;海底低速带较陆上简单,海上多波资料的记录面貌较陆上多波资料好;而且海上油气田的勘探和开发存在着许多用纵波勘探难以解决的问题(如硬海底、浅层气和气柱等),这些都促进

了海上多波勘探的发展,使之成为多波勘探的一大亮点。

3. 发展现状

3.1 数据采集

多波(多分量)地震勘探包括纵波与转换波的联合勘探、二维三分量、三维三分量和三维九分量勘探等多种形式,另外还有井中、井间多分量地震等。由于横波(SH波)震源技术还不够成熟,所激发的能量还不够,获取深层反射SH波还比较困难,目前大多数地面多波(多分量)地震勘探主要还是纵波与转换波的联合勘探。

OBC电缆的出现,使近年来海上多波勘探得到了迅速的发展。海底电缆的采集效率高,而海底低速带较陆上简单,故海上多波地震资料的记录面貌较陆上多波地震资料好得多。如海底检波器使频带向两端拓宽;固定在海底的检波器比拖缆检波器能采集到更完整的数据集,偏移距可从零变到非常大,360°方位角上的数据都可以采集到,进而提高噪音衰减、照度和成像;植入海底的垂直电缆串,可以更好地压制多次波和更好地进行储层成像等。

(1)震源

陆上横波激发有多种方式,主要包括三排井震源、壕沟爆炸索、水平可控震源、车装重锤、倾斜气枪震源等。

但由于横波震源造价较高,且对地表的破坏大,横波能量衰减也很快,信噪比低,故目前多波勘探常采用纵波激发、三分量接收的转换波勘探。转换波勘探实际上用的是纵波激发震源,包括炸药震源、纵波可控震源或空气枪等。

(2)检波器

陆地多分量勘探最早使用的是双检波器,即除了一个测量地面垂直分量的常规检波器外,再设计一个专用于测定地面运动水平分量的检波器。目前主要采用三分量数字检波器接收(九分量采集只作了极少数试验工作)。由于非纵分量的信号较弱,且频率偏低,频带较宽,要求三分量检波器的频带宽一些,自然频率低一些。

并且三分量数字检波器的应用仍然处于初始阶段,有时在使用三分量数字检波器采集的同时,还使用传统纵波检波器进行采集,以保证纵波资料的质量。同时也可以将常规纵波检波器得到的资料与三分量数字检波器得到的纵波资料进行比较研究。

(3)观测系统

无论是海上多波勘探,还是陆上多波勘探,因为记录道数成倍地增加(海上采集为4倍,因为海底采集4个分量:3个速度分量,1个压力分量;陆上采集为3倍、4倍或9倍,故需要增加采集系统的记录道数。为了同时提高分辨率和信噪比,需要尽可能取消组合、减小道间距、实现三维采集,这就更需要极大地增加采集系统的记录道数。因此,多波地震勘探采集的一个发展方向就是实现超多道采集。

根据纵、横和转换波的不同特点,观测系统的设计要考虑转换波转换点向接收点的偏移而加大接收排列,但同时要照顾到纵波的接收而保证近炮点接收。根据波场特征调查资料上目的层纵波、转换波或横波出现的时间—空间位置选出合适的偏移距。一般说,最大炮检距以观测到主要目的层为原则,最小炮检距由避开干扰而定。道间距要保证对观测的反射信号有足够的空间采样率。在设计组合时,应考虑增强反射信号和压制干扰。一般可以假定纵波与横波的波长一致,所以二者的组合设计从保持反射信号方面来说,应该是一样的。观测时可采用端点放炮排列或中间放炮排列。多波多分量地震勘探对覆盖次数要求不高,因为叠加太多,虽然会提高信噪比,但会损失信号中保留的一致性较差的分裂波信号。

3.2 数据处理

多波多分量地震资料的常规处理方法已经逐步完善。转换点的确定、CCP道集的抽取、转换波速度分析、干扰波的压制、转换波DMO等方法都取得了较大的进步,但由于极大量的数据处理、参数的非直观物

理与地质意义解释、参数多、反演难等一系列问题的存在,多波多分量地震资料处理仍然面临相当大的挑战,还存在很多难题。

(1) 不对称抽道

由于 P-SV 波的射线路径是不对称的,所以不能用共中心点叠加技术。解决这一问题的方法是,设法把同道集内的各道相应的 P-SV 波反射点集中到偏移距(x)最小的那一点上,对应于该点的新的一组接收点位置,可由近似公式

$$x_s = x[1 + (v_s/v_p)] \quad (1)$$

来计算反射点与震源之间的水平距离,也就知道了该地震道属于哪个共反射点了。

(2) 波场分离

日前多分量地震数据的处理基本上是先进行波场分离然后分别处理纵波和横波和转换波。经过解编后的地震反射信号都完全被分配到 X、Y、Z 三个方向上。但这时的三方向分量并不完全代表纯纵波和纯横波的反射。即纵波或横波由于非垂直入射均会在 XYZ 方向产生分量。所以波场分离就是将叠前三分量信号中存储的纵波和转换波的信号分离,形成纯纵波、P-SV、P-SH 波的剖面。

但地下传播的地震波场是耦合的,目前已发展的波场分离方法基本上都难以达到纵、横和转换波的完全分解,直接影响到多波勘探的最终结果,这也是多波多分量地震勘探至今未取得突破性进展的主要原因之一。

(3) 横波静校正问题

根据 P-SV 波的形成特征,其静校正由 P 波的炮点静校正量加上 S 波的检点静校正量组成。震源的 P 波静校正和一般 P 波反射的静校正是一样的。而 S 波的检点静校正与 SH 波静校正相同,可分为 3 步进行:第 1 步是高速静校正;第 2 步是低速带校正;第 3 步是剩余静校正。

虽然发展了一系列方法,但没有取得根本性的突破,其原因也显而易见:在许多复杂地区,纵波静校正问题目前还没有完全解决;横波由于相应的低速带更复杂,资料信噪比更低,加上可能存在的方位各向异性的影响,难度要比纵波静校正大得多。

(4) 动校正

对于 P-SV 反射波也可用类似于共反射点叠加的近似法,即可把 P-SV 反射波的动校正公式写成类似于 P 和 S 反射波的动校正公式

$$t_s^2 - t_0^2 = \frac{2}{v_s^2} h_s^2 \quad (2)$$

式中 v_s 为叠加速度。因此 P-SV 波的叠加速度的求取也可以和 P 波和 S 波的叠加速度求取方法一样。

对转换波来说,除了成层性和各向异性以外,甚至在均匀各向同性的情形下,由于自身的转换效应,也会产生非双曲的正常时差。另外,极化各向异性对 S 波产生的能量比 P 波大(在数量级上)。虽然已发表了一些准确的转换波非双曲成像方法,但是这些方法大体上都需要精确地估算转换点横向偏移的位置,这种估算与介质的成层性和各向异性密切相关。

(5) 共反射点叠加

P-SV 波的不对称抽道集一般是用近似公式计算的,因此道集上的 P-SV 波时距曲线为不严格的双曲线,不能用常规叠加程序,而应该采用相干叠加。相干叠加的实施是根据水平叠加剖面,沿若干个层开窗,在时窗中对共反射点道集中的每一道与叠加道做互相关,求出时差,进行校正,然后再叠加。

(6) 叠前偏移

值得注意的是纵波叠前深度偏移方法已经开始应用到多分量资料的处理之中。现已形成了一种实用的横向各向同性介质的 P-SV 波叠前偏移和速度分析方法,推导出一种横向各向同性介质的转换波双平方根(DSR)偏移方程。通过偏移速度、纵波与横波的速度比和 Thomsen 参数来描述这个偏移方程。利用偏移速度分析和交互叠加的过程来估算这些参数。

利用统一的速度-深度模型进行多分量地震资料的叠前深度偏移是一个极具发展前景的方法。当然,存在的问题也很多。与纵波叠前深度偏移一样,多分量资料叠前深度偏移也需要迭代处理,而且,影响迭代结果的因素更多。核心的问题当然还是速度-深度模型的问题。这就涉及到多分量资料纵、横波速度联合反演。速度反演和叠前深度偏移实际上是一个大的迭代循环中的两个步骤。利用多分量资料进行这一工作虽然更为复杂,但能减少解的非唯一性。

3.3 资料解释与应用

多波多分量地震解释的基础是对纵横波剖面进行准确的层位对比,这是多波勘探能否取得地质效果和经济效益最关键的一环。纵波、

横波传播机理不同、传播路径及反映介质的性质不同,在剖面上表现的特征(如波形、振幅、频率、相位、偏振)都会有所不同,所以在层位的对比解释上会有一定难度。横波速度较低,无法简单地进行纵横波剖面层位对比。但是,我们要识别的终究是同一层位的反射纵波和横波,如果纵波和横波具有相同或者相近的子波,就可以进行层位对比。现在通常采用的剖面对比方法有:①利用地质构造和岩性特征不变性进行层位对比;②利用地层厚度和埋藏深度一致原则进行层位对比;③地震相相似特征对比;④微细结构特征对比;⑤利用 VSP 建立纵横波反射的对应关系;⑥利用纵横波的合成记录对比和利用反褶积对逐个脉冲波进行对比等方法。

在保证纵横波正确对比的基础上,可利用提取的参数和信息进行岩性预测、构造成像、各向异性及裂缝分析、油藏监测等。

(1) 利用横波获得分辨率较高的地震资料,识别小断层、小构造、尖灭及薄层等细小的地质现象。

在同一介质中横波的运行速度比纵波的低,由于波的分辨率由波长决定,频率 f 相同的波运行速度 v 越低则分辨率越高,由此可以期望横波能提高分辨率;但是,横波的吸收衰减强于纵波,吸收衰减主要在高频率成份的衰减上,故横波的高频率成份低于纵波。由于频率成份低部分抵消了速度低的优势,横波分辨率的提高是有限的。当然,从总的结果看,特别是从实际资料看,横波的分辨率还是比纵波要高一些。

(2) 在纵波勘探得不到好资料的某些地区改善成像质量,查清地下构造。

在某些地区,由于种种原因纵波勘探难以得到好的记录。例如在高速碳酸盐岩、火成岩和硬石膏等出露的地区及硬海底地区,纵波记录信噪比极低,这主要是高速层中的多次反射、声波等高速高频干扰难以消除,无法获得好的成像结果;由于横波速度低,到达时晚,常可以躲开强烈的多次反射等高速高频干扰,得到较好的成像结果,有利于查清构造。又如在浅层气发育或储层位于气柱之下的地区,由于纵波通过浅层气或气柱时性质变化较大,使纵波剖面上浅层及浅层之下的储层产生畸变和散焦等一系列失真现象,严重影响对感兴趣的含油气构造的解释。而因横波不受气存在的影响,同一地点的横波剖面上就没有这些失真现象,可以获得较好的成像结果,有利于查清这些构造。

(3) 利用纵、横波振幅信息进行流体描述,直接寻找油气藏。

纵、横波振幅值与界面反射系数密切相关。在纵波振幅恢复剖面上,岩石孔隙中是否含有油气或油气含量的多少可以通过振幅异常反映出来,这是因为纵波速度对孔隙中的油气(特别是气)十分敏感,界面纵波反射系数发生变化,形成亮点(强振幅异常)或暗点(弱振幅异常)。但是,某些非油气因素也会引起纵波反射系数发生变化出现亮点,这便是所谓的假亮点。当砂岩含气时,纵波速度会大大降低,而横波速度却不会产生变化,因此,纵波剖面上有亮点而横波剖面上无亮点,这是真亮点;反之,二者都是强振幅则是假亮点。故综合利用纵、横波振幅信息就可以识别真假亮点,直接寻找油气藏。

(4) 获得较多的岩性参数,有利于研究岩性变化,发现岩性油气藏。

许多研究表明,地层的纵横波速度比 v_s/v_p 与岩性有关。试验结果表明,随着砂岩百分比的增加, v_s/v_p 值呈增大的趋势,不同的岩石有着不同的 v_s/v_p 值范围。利用多波勘探资料可以方便地求取纵、横波速度,进而得到纵横波速度比。泊松比 σ 是表征岩石物理性质的一个重要参数,它与波速比有确定的关系,不同的岩石有着不同的泊松比范围,可以通过纵横波速度比求出。利用纵、横波速度还可以求出切变模量 P、杨氏模量 E、体积模量 K 以及密度 P 等一系列物性参数,它们是分辨岩性的基本参数。有了这些参数,有利于我们研究岩性变化,预测岩性,发现岩性油气藏。

(5) 介质各向异性研究,探测裂隙。

实际介质中往往存在方位各向异性。目前研究得较多的仍然是垂直对称轴的横各向同性(VTI)介质的处理和解释,因为这种介质较为简单,与实际的裂隙介质较为接近。碳酸盐岩或泥岩地层中的油气往往与裂隙有关。一般来说,纵波对各向异性的反映不明显,而横波则对各向异性相当敏感。当横波进入各向异性介质时会发生分裂现象。

根据横波分裂理论,当横波通过方位各向异性介质时,会分裂成两个偏振方向正交的横波,一个波的偏振方向与裂缝走向平行,速度较快,称之为快横波,另一个波的偏振方向与裂缝方向垂直,速度较慢,称之为慢横波。利用数据处理中的旋转扫描得出最佳旋转角度,就可以得出地下裂缝的方位。在处理后的快、慢横波剖面上拾取相应的初至波时间就能得到延迟时间并计算出方位各向异性系数。

因此,利用多波资料中的横波分裂现象可以研究介质的方位各向异性问题,探测裂隙型油气藏。

目前已经发展了许多有关处理和解释的方法,包括极化分析、横波

分类分析、各向异性参数的提取和慢慢波方位旋转处理等,但在实际工作中广泛应用的并不多见,原因当然是方位各向异性问题过于复杂。另外,在处理中或在解释中如何协调考虑方位各向异性问题是一个难题。如果在处理中不考虑方位各向异性问题,则结果剖面质量可能会不好,但剖面上方位各向异性现象(如交叉剖面不闭合)可能较明显,解释中比较好利用;反之,则结果剖面上可能难以看到方位各向异性现象,但结果剖面的质量可能会好一些。方位各向异性是一个非常复杂的问题,需要长期研究。

(6) AVO 分析

利用多波 AVO 曲线可反演地层 P 波速度 V_p , S 波速度 V_s , 地层密度 ρ 。若以各向异性介质 AVO 曲线为基础,还可反演地层各向异性参数。

多波 AVO 中的 P-SV 波 AVO 分析比 P-P 波复杂,但它的信息比 P-P 波丰富,具有独到的优点。线性拟合简化的 Zeppritz 方程,就可得到多种 AVO 属性剖面。结合 P 波 AVO 分析形成多波 AVO 分析系统,对提高多波资料综合解释效果有重要意义。

(7) 油藏监测

蒸汽驱油藏温度和饱和度变化会引起油藏岩石性质的变化,从而影响到 P-P 波、P-S 波响应。利用 P-P 波和 P-S 波剖面上的变化特征,可以确定蒸汽前缘。

4. 发展趋势

(1) 多波(多分量)地震技术的发展在很大程度上还依赖于纵波资料采集、处理和解释方法的发展。

例如,超多道采集系统的出现可以同时提高纵波勘探的信噪比和分辨率,也可以用于多波地震勘探,对多波勘探的发展有很大的促进作用,起码使纵波和转换波联合勘探的采集工作摆脱了难以同时照顾纵波和转换波的困境。又如,目前纵波叠前深度偏移方法的不完善(使用厚度速度模型,以克希霍夫积分法为主等)不但影响多波叠前深度偏移结果的改善,也影响到其他一些关键问题(如层位对比问题)的解决。纵波勘探方法肯定会不断地发展。因此,多波地震技术必然会不断地进步。

(2) 多波多分量地震将更多的采用转换波

尽管横波勘探在处理方面比较简单,但存在着信噪比低和静校正等问题,野外采集的代价比较高。而转换波经过多年的发展,处理技术已基本成熟,由转换波射线路径不对称带来的处理困难已经基本得到解决,慢慢横波分离也已经找到了切实可行的方法,此外,野外采集成本比横波勘探更小,因此,以纵波震源激发、三分量接收的转换波勘探将会成为多波多分量地震的主要方法。

(3) 在多波地震资料的处理中,深度域的处理是关键。

多波资料联合速度反演加多波资料联合叠前深度偏移,可望解决多波资料处理的根本问题。目前大多数常规多波资料处理方法还只是简单的拼凑方法,还没有实现真正的联合资料处理。只有深度域处理才是真正的多波资料联合处理。从表面上看,多波资料速度反演和叠前深度偏移的迭代过程中,影响迭代的因素增加了,情况更复杂,更难得到解决。但实际上由于增加了新的信息源(横波),因而对解的约束也就增加了,结果应该更为稳定,更容易得到解。核心是如何使用新的信息。例如,在常规多波资料处理中,因纵、横波速度不同,到达时不同,时间域处理很难将二者统一起来,但深度域中二者有一个共同之处,即深度一致。因此,时间域中到达时不一致的难题在深度域中成了有利条件。利用“不同类型地震波处理后具有相同结果”这一条作为约束条件或判别迭代是否收敛的准则可以得到更稳定的解。

(4) 方位各向异性问题的利用是多波地震勘探方法中最有发展前途的内容。

由于单纯利用纵波难以解决方位各向异性问题,因此它必然成为多波地震勘探的重点。当然,方位各向异性问题的解决难度相当大,无论是在资料处理中考虑方位各向异性的影响,还是利用横波对方位各向异性的敏感进行裂隙预测都不简单,这里可能还存在着一个求解必须先知道解的“怪圈”:如果在处理中能完美地考虑方位各向异性问题,就能得到好的结果剖面和精确的方位各向异性参数,进行裂隙预测就是一件十分容易的事;但是,这样做必须先对方位各向异性问题了解得很清楚,如果事先不了解介质方位各向异性的情况,就无法在处理中考虑方位各向异性问题,就得不到好的结果剖面和精确的方位各向异性参数,预测难度大大增加。

(5) 超多道地震采集技术和大容量信息储存技术是多波地震勘探发展的基础。

这两个问题解决了,不管多分量地震资料处理和解释技术发展得还多么不完善,纵波和转换波联合勘探也必将代替单纯纵波勘探成为常规勘探方法。毕竟,只需增加少量的费用就可以得到丰富的信息,使

用这些信息有可能解决以往无法解决的问题,何乐而不为呢?当然,严格意义上的多波地震勘探应该是三维九分量勘探,因为只有这样,才能采集全部多波资料,包括 P-P 波、SH-SH 波、SV-SV 波和各种转换波。但这种勘探除对采集技术和存储技术有所要求之外,还对激发技术有所要求,成本太高,在多分量地震资料处理和解释技术没有获得革命性的进步之前不太可能进入生产实际。

(6) 联合反演

地而多波和三分量 VSP 的结合日益紧密。井间地震与测井信息的结合有助于转换波的解释。这种结合能为正演模型提供有价值的输入,这对岩石及流体特性的描述是很关键的。除了速度和密度,对转换波应用最关键的两个特性是各向异性及衰减。仅从地表地震资料来测定这些特性是很困难的,但是,如果结合井间地震资料,测定就变得容易。

总之,多波多分量地震勘探技术虽然还存在很多难题和缺点,但它的研究应用领域正在不断深入和扩大。由于其具有单纯纵波勘探所不具有特殊优势,取代纵波勘探是不可逆转的发展趋势,相信随着技术的进步,多波多分量地震勘探将会有更加广泛的应用,在未来的油气勘探中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 姚姚. 多波地震勘探的发展历程和趋势展望. 勘探地球物理进展, 2005, 28(3): 169-173
- [2] 赵铨. 欧美应用地球物理现状——多波地震勘探. 中国煤田地质, 1994, 16(6): 47-49
- [3] 徐丽萍, 杨勤勇. 多波多分量地震技术发展展望. 勘探地球物理进展, 2002, 25(3): 47-52
- [4] 杨德义, 彭苏萍. 多分量地震勘探技术的现状与进展. 中国煤田地质, 2003, 15(1): 51-54
- [5] 田晓红. 多波多分量地震勘探的现状与进展. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(4): 94-96
- [6] 石玉梅, 姚逢昌, 曹宏. 多波多分量天然气勘探技术的进展. 勘探地球物理进展, 2003, 26(3): 172-177
- [7] 黄中玉. 多波地震勘探技术研究及其在储层描述中的应用. 西南石油学院博士学位论文, 2005: 35-85
- [8] 隋荣亮. 多波多分量地震勘探技术. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2006: 2-60
- [9] 李录明, 罗省贤. 多波资料处理及解释方法的研究进展. 石油地球物理勘探, 2006, 41(6): 663-671
- [10] 黄中玉. 多分量勘探技术. 勘探地球物理进展, 2003, 26(5-6): 413-422
- [11] 王磊, 李建荣等. 多分量转换波地震勘探技术. 油气地质与采收率, 2002, 9(6): 1-4
- [12] 刘志田. 海上多波地震勘探技术研究. 中国海洋大学硕士学位论文, 2003: 4-20
- [13] 张永刚, 王妙月等. 目前多分量地震勘探中的几个关键问题. 地球物理学报, 2004, 47(1): 151-155
- [14] 黄中玉. 多分量地震勘探的机遇和挑战. 石油物探, 2001, 40(2): 131-137
- [15] 詹正彬, 姚姚. 多波及横波地震勘探. 北京: 地质出版社, 1994, 1-117
- [16] 海上多波地震勘探技术国内外最新动态[J]. 863-820 主题通讯, 1998, (2): 1-83
- [17] Gaiser James, Moldoveanu Nick. Multicomponent technology: the players, problems, applications, and trends. The Leading Edge, 2001, 20(9): 974-977
- [18] Davis T L. Multicomponent seismology: The next wave. Geophysics, 2001, 66(1): 49
- [19] Stewart R R, Gaiser J E. Converted-wave Seismic Exploration: Applications[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 40-57
- [20] Stewart R R, Gaiser J E. Converted-wave Seismic Exploration: Methods[J]. Geophysics, 2002, 67(5): 1348-1363
- [21] Begay D K, Miller R D, Watney W L, et al. High-resolution P and S-wave reflection to detect a shallow gas sand in south-east Kansas[J]. Expanded Abstracts of 70th Annual Internat SEG Mtg, 2000, 1319-1322
- [22] Klimentos T. Attenuation of P- and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water[J]. Geophysics, 60(2): 447-458
- [23] Side Jin. Characterizing reservoir by using P- and S-wave AVO analysis. 69th SEG, Expanded Abstracts, 1999

多波多分量地震勘探的现状与发展趋势

作者: [胡朝勇](#), [朱明](#), [修中标](#)
作者单位: [浙江省第一地质大队地质环境院](#)
刊名: [科技信息](#)
英文刊名: [SCIENCE & TECHNOLOGY INFORMATION](#)
年, 卷(期): 2009 (26)

参考文献(23条)

1. [李录明;罗省贤](#) [多波资料处理及解释方法的研究进展](#)[期刊论文]-[石油地球物理勘探](#) 2006 (06)
2. [隋荣亮](#) [多波多分量地震勘探技术](#) 2006
3. [黄中玉](#) [多波地震勘探技术研究及其在储层描述中的应用](#) 2005
4. [石玉梅;姚逢昌;曹宏](#) [多波多分量天然气勘探技术的进展](#)[期刊论文]-[勘探地球物理进展](#) 2003 (03)
5. [田晓红](#) [多波多分量地震勘探的现状与进展](#)[期刊论文]-[大庆石油地质与开发](#) 2005 (04)
6. [杨德义;彭苏萍](#) [多分量地震勘探技术的现状与进展](#)[期刊论文]-[中国煤田地质](#) 2003 (01)
7. [徐丽萍;杨勤勇](#) [多波多分量地震技术发展展望](#)[期刊论文]-[勘探地球物理进展](#) 2002 (03)
8. [Side Jin](#) [Characterizing reservoir by using P-and S-wave AVO analysis](#) 1999
9. [Klimentos T](#) [Attenuation of P-and S-waves as a method of distinguishing gas and condensate from oil and water](#)[外文期刊]
10. [Begay D K;Miller R D;Watney W L](#) [High-resolution P and S-wave reflection to detect a shallow gas sand in south-east Kansas](#) 2000
11. [Stewart R R;Gaiser J E](#) [Converted-wave Seismic Exploration:Methods](#)[外文期刊] 2002 (05)
12. [Stewart R R;Gaiser J E](#) [Converted-wave Seismic Exploration:Applications](#)[外文期刊] 2003 (01)
13. [Davis T L](#) [Multicomponent seismology:The next wave](#)[外文期刊] 2001 (01)
14. [Gaiser James;Moldoveanu Nick](#) [Multicomponent technology:the players, problems, applications, and trends](#)[外文期刊] 2001 (09)
15. [海上多波地震勘探技术国内外最新动态](#) 1998 (02)
16. [詹正彬;姚姚](#) [多波及横波地震勘探](#) 1994
17. [黄中玉](#) [多分量地震勘探的机遇和挑战](#)[期刊论文]-[石油物探](#) 2001 (02)
18. [张永刚;王妙月](#) [目前多分量地震勘探中的几个关键问题](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2004 (01)
19. [刘志田](#) [海上多波地震勘探技术研究](#) 2003
20. [王磊;李建荣](#) [多分量转换波地震勘探技术](#)[期刊论文]-[油气地质与采收率](#) 2002 (06)
21. [黄中玉](#) [多分量勘探技术](#)[期刊论文]-[勘探地球物理进展](#) 2003 (5-6)
22. [赵镨](#) [欧美应用地球物理现状--多波地震勘探](#)[期刊论文]-[中国煤田地质](#) 1994 (06)
23. [姚姚](#) [多波地震勘探的发展历史和趋势展望](#)[期刊论文]-[勘探地球物理进展](#) 2005 (03)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_kjxx200926545.aspx