

# 国外应用纵波各向异性技术检测裂缝的研究进展

尹志恒<sup>1</sup>, 狄帮让<sup>1</sup>, 李向阳<sup>1</sup>, 张征<sup>1</sup>, 魏建新<sup>1</sup>, 邓元军<sup>2</sup>

1. 中国石油大学(北京)CNPC物探重点实验室, 北京 102249
2. 中海油能源发展股份有限公司监督监理技术服务分公司, 天津 300452

**摘要** 裂缝性油气藏作为一种重要的油藏资源, 已经成为地震勘探研究的热门课题。相对于国内而言, 国外应用各向异性技术来检测裂缝的研究开展较早并逐渐成熟。本文回顾了各向异性技术的由来和发展, 介绍了裂缝研究使用的有效介质理论, 总结了纵波各向异性应用于裂缝检测的新技术新方法。分析表明, 随着关注度的增强和采集处理技术的发展, 裂缝检测技术的方法更加多样, 实际应用的有效性得到提高。

**关键词** 各向异性; 裂缝; 地震勘探; 检测; 有效介质

**中图分类号** P631.4

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.30.011

## Progress in P-wave Anisotropy Technology for Fracture Detection

YIN Zhiheng<sup>1</sup>, DI Bangrang<sup>1</sup>, LI Xiangyang<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, WEI Jianxin<sup>1</sup>, DENG Yuanjun<sup>2</sup>

1. CNPC Key Lab of Geophysical Exploration, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Energy Technology & Services Limited Supervision & Technology Company, CNOOC, Tianjin 300452, China

**Abstract** The knowledge that the propagation of elastic waves can be anisotropic is about 180 years old. At the turn of the 20th century, Rudzki suggested the significance of seismic anisotropy. He studied many of its aspects, but without a real application of his ideas. Research in seismic anisotropy became stagnant after his death in 1916. Beginning at about 1950, the significance of seismic anisotropy for exploration seismics began to be studied, mainly in connection with thinly layered media and the resulting transverse isotropy. But it became clear that the effect of the layer induced anisotropy on the data acquired with the techniques of that time was negligible. In the last two decades of the 20th century, Crampin pointed out that the cracks in a rock mass lead to observable effects from which, in principle, the orientation and the density of the cracks could be determined. Since this information has a direct relevance to the reservoir properties of the rock, the interest in seismic anisotropy was increased considerably. The seismic anisotropy study came into a new era, with more scholars and oil companies focusing their attention on this field. Recent advances in the acquisition technology, the computer technology and the seismic processing technology have allowed the incorporation of anisotropic models into a wide range of seismic methods. In particular, the vertical and tilted transverse isotropies are currently treated as an integral part of the velocity fields employed in pre-stack depth migration algorithms, especially those based on the wave equation. Continued progress in the data-acquisition technology is likely to spur a transition from the transverse isotropy to lower anisotropic symmetries, e.g. orthorhombic ones. With the role of the anisotropy in the seismic exploration in mind, we discuss the origin of anisotropy, P-wave velocity analysis and imaging, processing, moveout inversion of wide-azimuth data, amplitude-variation-with-offset and AVO analysis and fracture characterization. Today, the anisotropy, as an important part in exploration and reservoir geophysics, has been included in every exploration geophysicist's toolkit.

**Keywords** anisotropy; fracture; seismic exploration; detection; effective media

收稿日期: 2011-08-20; 修回日期: 2011-09-27

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05019-008)

作者简介: 尹志恒, 博士研究生, 研究方向为地震物理模型和各向异性等, 电子信箱: yin212155@163.com

## 0 引言

地下发育的裂缝往往是油气存储的重要场所,而裂缝作为一种普遍现象广泛地存在于各类岩石地层之中。随着油气勘探开发的不断发展,裂缝性油气藏将是未来需要关注的重要领域。然而裂缝性油气藏比常规油气藏更难于勘探。裂缝的形成受多种因素控制,其物理属性复杂,横向、纵向变化大,表现出很强的各向异性。因此利用各向异性的地震响应检测裂缝被地球物理学家们研究,并逐渐丰富和成熟。

## 1 各向异性起源及在地震勘探中的发展

### 1.1 各向异性概念的出现

人们意识到弹性波有各向异性已经有 180 年的历史了<sup>[1]</sup>。最开始关注这方面研究的是 19 世纪初的最顶级的科学家,如 Cauchy, Fresnel, Green, Kelvin 等。各向异性主要是在晶体光学和晶体弹性研究中有所应用。当时科学家提出这个概念是由于对光传播现象的一些错误的理解。在各向同性介质中,理论和实验都证实同时存在着纵波和横波。当时人们认为光是一种波动现象,以横波的方式传播,这让他们迷惑不解,认为是由于各向异性的存在使得纵光波缺失。就这样,各向异性的概念出现了。在那些年中,一些概念定义的正式提出对后来各向异性的研究发展起到了很重要的作用。

Green 首次推荐使用 21 个弹性常数对任意各向异性介质弹性性质进行描述。1856 年, Thomson<sup>[2]</sup> 因为对金属感兴趣,专门进行了弹性固体介质的研究。他发明了一些数学概念,例如矢量、张量等,称为用弹性波动方程表示各向异性介质的第一人。但是由于研究太超前,在 20 世纪后期人们才了解他对弹性各向异性理论的重大贡献。Christoffel<sup>[3]</sup> 在他的专著中提出了和 Kelvin 一样的特征体系方程,因此今天将各向异性波动方程称为 Christoffel 方程。

各向异性进入到地球科学是在 19 世纪的后期。Rudzi<sup>[4]</sup> 报道称,很多岩石可以被视为各向同性介质,但是对于在一定深度埋藏的岩石,由于受到不均匀压力可能会出现双折射现象,不可以视为同性的。还有就是层状岩石由于其本身的结构也不可以简单地视为各向同性介质。在随后的研究中,他试图确定横向同性(Transversely Isotropic, TI)介质中的波前面,并第一个提出垂直分量上的横波的波前会出现三叉现象。在他之后,有一段时间的沉寂,慢慢地,地球科学界对各向异性的认识有所加深。随着技术的进步,人们认识到地幔的大部分和地球的内核都是各向异性的。

### 1.2 地震勘探中的各向异性

随着各向异性技术被人们所接受,人们利用它在不同领域内进行研究,本文只关注其在地震勘探开发方面的发展。

1920—1950 年是地震勘探学的初期,各向异性几乎没有人关注,只有少数几篇关于这方面的文章。其中, McCollum 和 Snell 在 1932 年对出露的页岩进行了速度测量,得到的结果显示不同方向上速度的差异达到 40%。但是他们的文章没有得到美国和欧洲学者的重视。和他们遭遇相同的是 Zisman 在

1933 年发表的关于岩石实验室测量的几篇文章。还有 Love 研究了横向各向同性介质中应力和应变之间的关系,以及介质与面波体波的关系。横向各向同性这个名词最先就是由 Love<sup>[5]</sup> 提出的。Bruggeman<sup>[6]</sup> 指出层状固体具有轴对称性,他是周期性薄互层模型(Period Thin Layer, PTL)的理论奠基人。

1950 年后,实际资料中观测到的各向异性现象进一步丰富,研究集中在旅行时等运动学特征,各向异性仍然不能算是热门研究。1951—1970 年间,在 *Geophysics* 和 *Geophysical Prospecting* 这两个地球物理界重要的刊物上,平均每年不到一篇关于各向异性的文章。

在勘探地震学中,介质的各向异性的概念是相对的,即使是一系列各向同性的地层,当研究对象的尺度远小于地震波长,导致研究中弹性性质随方向变化而改变的话,这一系列的地层就认为是各向异性的。根据这样的概念,学者们认识到沉积盆地的周期性薄互层是横向各向同性的。Postma 和 Helbig 都进行层介质引起的各向异性研究。Krey 和 Helbig 指出,对于横波与纵波的速度比值变化不大的层状介质进行纵波勘探,如果观测系统是窄方位,这符合当时的勘探水平,各向异性的影响可以忽略。Gassmann 和 Helbig 分别给出了上覆岩层是各向异性时的地震折射勘探的完整的计算方法。前者基于波前面,更易于折射方法的解释;后者基于慢度面,更利于分析和成图。但是,折射方法在当时没有被应用于实际生产中。Crampin 讨论了各向同性和各向异性介质中的平面波频散。在这段时间,还有 Fedorov, Musgrave 和 Auld 等对各向异性介质的弹性波物理学理论做出过较大的贡献。这一时期的观测和研究为以后的发展作好了铺垫。

在传统的地震勘探中,之所以未能很早期地使用各向异性技术的原因主要有 3 方面:(1) 因为各向同性介质模型是地球介质模型的一个很好的近似,在一定程度上可以解决很多实际问题;(2) 由于采集技术的限制,观测的精度不高,采集方式和采集数据的单一性使得从资料中观测不到明显的弹性波各向异性;(3) 各向异性技术难度本身很大,处理和解释技术都需要进一步的改进才可以进行各向异性的研究。

从 20 世纪 70 年代后期开始,地震勘探中的各向异性研究进入到快速发展的阶段。Crampin, Hudson, Thomsen 等对此发展有很重要的贡献。Crampin 提出的方位各向异性和横波分裂这些概念,极大地推动了各向异性技术的发展。使得更多的学者和石油公司关注各向异性研究。可以说他的理论开创了各向异性技术的新纪元。Crampin<sup>[7]</sup> 用反射率法合成地震记录,证实了地震波横波分裂现象的存在。Gupta<sup>[8-9]</sup> 和 Crampin<sup>[10-13]</sup> 都指出通过设计合适的实验可以观测到定向排列的裂缝或者压力可以引起方位各向异性。Crampin 定义了一套统一的泛称各向异性理论(Extensive Dilatational Anisotropy, EDA)。主要内容有:(1) 岩石块中的裂隙易形成在最小纵向压力的垂直方向上;(2) 在储层深度位置,最大的纵向压力来自于上覆压力,所以裂隙发育在垂直面上;(3) 这些情况会产生方位各向异性(最简单的例子就是 HTI 介质,即具有水平对称轴的横

向各向同性介质);(4) 双分量或者三分量技术就可以观测到横波分裂;(5) 通过这些测量可以推测压力情况和岩石中的微裂隙。因为所有的岩石都有裂隙核(晶界,微构造裂隙,热膨胀和收缩造成的裂隙),所以这种现象很普遍。后来 Crampin 和 Peacock<sup>[14]</sup>运用新的技术观点说明这一现象。方位各向异性虽然比具有垂直对称轴的横向各向同性 (TI with vertical axis, VTI)介质的分析要更加复杂,但是由于裂隙的走向和密度与岩石的渗透率有关联,人们对此兴趣更大。Crampin 一直关注着各向异性技术的发展,特别是横波分裂方面,陆续在很多杂志中发表了一些综述性的文章。Danbom 和 Domenico<sup>[15]</sup>等在 1987 年曾对横波勘探技术进行了回顾,其中较为详细地介绍了 Crampin 的理论。

Hudson<sup>[16-17]</sup>对裂隙介质进行研究。定义了裂隙密度的概念,导出了裂隙介质的应力-应变的本构关系,给出了不同裂隙参数下的速度以及衰减的表达式。虽然他的裂隙理论需要满足裂隙彼此分离等很多假设条件,但他是分析研究裂隙参数对速度影响的第一人。

还有 Thomsen 经典的弱各向异性理论和简化的各向异性参数,它们的提出使各向异性分析和应用更加方便。从纯数学和物理的观点上看,各向同性的标准是在所有方向上,介质的性质相同,不存在特殊意义的方向。但是应用到地球物理学,垂直方向在一个有着特殊意义的方向(一般来说,它是采集地面和对称轴的法线方向)。所以用与垂直速度差异大小表征各向异性是有用的。针对这种情况,Thomsen<sup>[18]</sup>提出用 5 个参数描述弱各向异性介质。其中  $V_{p0}, V_{s0}$  是垂直方向上的速度。另外 3 个  $\epsilon, \delta, \gamma$  是无量纲的组合参数,当各向同性时,值为 0。它们的出现,使得在研究中,不需要知道每个弹性张量的数值就可以分析各向异性的大小。但是将研究对象认为是弱各向异性是否准确(要求  $\epsilon, \delta, \gamma \ll 1$ )不能确定,Wang<sup>[19]</sup>用实验室观测的手段对采集的岩石样本进行了各向异性的检测,结果显示弱各向异性普遍存在。但也有不少的样本  $\epsilon > 0.2$ 。这种情况的出现可能是实验室样本的压实要比野外实际沉积好,实际中速度的纵横比大约是 2。此外,由于各向异性与尺度有关系,高频的实验室测量可能伴随有分层效应。

Thomsen 系数这种物理意义更为明确的简化在此后地球物理分析中发挥了重要的作用。在各向异性介质地震数据分析中最关键的问题之一就是如何找到合适的参数设计模型。虽然在正演模拟算法中劲度系数使用起来很方便,但是它们对于地震处理和反演并不适合。对于地球物理研究来说,特别精确的波动方程表达式是困难和不必要的。如果假设研究对象的极性对称,各向异性的尺度比较弱,单个张量的意义不明确,它们的组合更好地显示了各向异性程度,使用 Thomsen 系数进行替换是一种很好的办法。5 个 Thomsen 参数中,参数  $\epsilon$  很接近纵波速度在垂直和平行于对称轴方向上的小数差异,因此它定义了通常人们所说的“纵波各向异性”。类似地,参数  $\gamma$  代表水平分量上的横波 SH 波的差异程度。虽然  $\delta$  的定义似乎不太好理解,但是它也有明确的含义:它控制着

对称轴以外的纵波速度变化,同时也会影响 SV 波速度。

尽管 Thomsen 最初假设各向异性很弱 ( $\epsilon, \delta, \gamma \ll 1$ ),但概念提出以后,他的思想就被认为是对于任意速度变化范围的横向各向异性介质中地震处理的最佳选择。实际上,Thomsen 参数结合了受地震波形特征约束的劲度系数。特别地,给定对称轴方向的横向各向异性介质的纵波运动学特征只依赖于 3 个 Thomsen 参数 ( $V_{p0}, \epsilon, \delta$ , 而  $V_{s0}$  影响可忽略不计)而不是 4 个劲度系数。极大地简化了正常时差(NMO)速度表达式,四次幂时差系数,振幅随偏移距变化(AVO)响应以及几何扩散效应,因此 Thomsen 的思想对反射波的处理特别方便,并有助于指导反演和算法优化。

在近 25 年间,勘探技术的提高使得采集到的数据类型更丰富、质量更好,例如非双曲线校正时差的大偏移距 P 波数据,多分量采集的地震数据,宽方位采集的 3D 数据,OBS 数据。此外,能力更强大的计算机的出现,可以使用更准确更复杂的计算方法,研究可以从原来很多限制性的假设中解放出来,提出更合适的近似处理采用新技术得到的数据。Thomsen 思想的原理已经被拓展到正交<sup>[20]</sup>,单斜<sup>[21]</sup>,甚至是更普遍的三斜<sup>[22]</sup>模型。例如,Tsvankin 的正交模型介质保持了 Thomsen 模型参数在描述对称面速度,旅行时等方面较好的特征。同时它还减少了与纵波运动学相关的参数个数,并提供了在正交或者横向各向异性模型中大方位角,多分量地震资料<sup>[23]</sup>的参数估计方法的统一框架。在结构复杂的上覆岩层下利用纵波垂直地震剖面(VSP)进行各向异性估计需要根据极化方向将垂直慢度分量表示出来,它使 Thomsen 类型的各向异性参数特定地用于 VSP 的应用。此外,Thomsen 的思想被推广到衰减的横向各向异性以及体波衰减系数的反演<sup>[24-25]</sup>。对于一个劲度矩阵的实部和虚部均为 VTI 对称的模型来说,这种思想(除速度各向异性参数之外)包括纵波和横波的垂直衰减系数以及和衰减各向异性有关的 3 个无量纲参数。各向异性参数中纵波相位衰减系数的线性化产生了一个与 Thomsen 弱各向异性估计的纵波相位形式完全相同的速度表达式。

目前各向异性技术已经成为地球物理界的热门课题,进入百家争鸣的阶段。其中有两个研究组成绩尤为突出。英国爱丁堡大学的各向异性项目组(EAP)从 1988 年起,每 3 年作为一个研究阶段,从最初的可行性理论验证到后续处理技术研究开发,再到实际应用、反演方法和解释理论研究。此外对转换波成像,各向异性与流体运移之间关系都做了大量工作。美国科罗拉多矿院以 Tsvankin 领导的 CWP 研究小组主要研究在各向异性介质地震波速度分析,走时反演,深度偏移和 AVOA 等方面。随着技术的不断进步,使用各向异性研究的领域也越来越广。本文只概述各向异性技术在检测裂缝方面的发展。

## 2 裂缝检测的各向异性发展

裂缝型油藏约占世界油气储量的 1/3。自然裂缝储层的勘探和开发需要对地震波通过裂缝岩石的特征进行研究解

释。由于地震波长的尺度问题,裂缝性储层往往呈现速度和衰减上的各向异性。对于裂缝介质的研究,有效介质理论和复杂裂缝描述等方面随着这些年各向异性研究的深化都取得了重大的进展。理论研究的进步主要归因于计算能力的提高,它使得研究人员能够构建出所谓的“数字岩石”,用以研究如交叉断裂、形状不规则、微褶皱以及断裂面部分接触等现实特征的弹性性质。

由于实际的裂缝形态复杂,而且无法准确获得地下裂缝的发育情况,有效介质理论仍然是目前进行裂缝研究的一种主要方法。当背景介质中所填充的不均匀包含物由于相对于地震波长尺寸太小,而不能被地震波区分出来时,就将背景介质和其包含物作为一个整体进行弹性参数的研究。

有效介质理论的使用最早是在固体力学。Eshelby<sup>[26]</sup>研究了同性背景介质中有单一椭圆形包含物的情况。而 Bristow<sup>[27]</sup>首次位给出了裂缝固体的有效弹性参数。他的理论其中有两个假设条件:裂缝之间是不联通的,而且裂缝发育方向的随机性会导致整体呈现各向同性。更为重要的是他定义了裂缝密度这个标量作为有效介质参数。他认为裂缝以其尺寸的3次方形式对整体介质产生影响。

此后又有大量的学者在此基础上进一步的推广研究,而地球物理界在这方面的研究相对滞后一些。Walsh 曾经检测了有效介质参数。两篇很重要的地球物理学研究文献是 Schoenberg<sup>[28]</sup>和 Hudson 于 1980 年和 1981 年分别发表的, Hudson 在假设介质包含比地震波长小得多的定向的稀疏排列的裂缝,裂缝呈薄的扁球体,纵横比较小的假设下,提出了含定向裂缝介质有效弹性模量的计算方法。而 Schoenberg 等则忽略了裂缝的形状和微结构,把裂缝看成是满足线性滑动边界条件的无限薄且非常松软的地层或平面,提出了线性滑动截面模型。然而他们的研究都是基于不联通假设。他们研究的最大区别是 Hudson 使用的是刚度系数,而后者使用的是柔度系数。后来两种理论都得到了发展,由开始时的各向同性背景介质的单组裂缝,发展到多组裂缝、各向异性背景介质。当背景介质为各向异性时,他们理论的不联通假设要进行更严格的假设定义。研究表明,对于不规则和交叉状的扁平裂缝的模拟,硬币型裂缝的柔度计算式的准确率很高。由于干裂缝会对有效弹性模量有很大的影响,所以进行研究时,最好使用更为复杂但是更为准确的 Schoenberg 理论。而对于水饱和和裂缝,两种理论的差别不是很明显,都可以有效进行预测。此外,1985 年 Thomsen 在流体压力均衡的条件下,引入了一套各向异性参数,并提出了决定裂缝对流体的敏感程度的参数流体影响因子,将 Hudson 理论的适用性推广到连通裂缝的情况。但是这几种比较出名的模型都假设各向异性情况与频率无关,无法进行微裂缝和宏观裂缝的区分。Chapman 给出了新等效介质模型,可以进行裂缝尺度的研究。他认为各向异性与频率有关,其研究针对大小两种尺度裂缝同时存在的情况。

目前来说,无法很好地比较几种有效介质理论的正确

性。随着计算机软硬件的提高,很多学者都利用数模对此进行了大量的研究。这些验证一方面说明了有效介质理论对假设条件的精确要求,另一方面也说明无法解析的对实际中的小尺度裂缝进行描述。还有其他学者认为裂缝的不平整的表面会有联通,他们按照自己的想法对裂缝的柔度进行了不同的定义。到底是哪种假设哪种理论更为有效,只有以后通过实际的岩石测量才可以得出结论了。

## 2.1 速度各向异性研究

以前人们通常使用测井数据进行裂缝检测,但是有效区域只能集中在井点周围。有些区域缺少井资料,则检测无法实现。在地震勘探方面,裂缝的存在会对地震波的传播特征产生影响,这就为利用这些各向异性特征研究裂缝提供了可能。在各向异性介质中传播时,横波会发生分裂,对裂缝的敏感度横波比纵波更强。利用多波多分量来进行裂缝的研究应该更有效。但是,这些技术在实际应用中存在着采集成本高,数据质量不高和处理技术难等问题。本文着重介绍纵波各向异性技术在裂缝检测中的应用。

宽方位角时差分析是基于动校正时差椭圆的概念和广义的迪克斯型平均方程<sup>[29]</sup>。动校正时差椭圆方程提供了一个校正随方位角变化的叠加速度的简单方法,而这些变化在传统的处理中经常被忽略。更重要的是,动校正时差椭圆的半轴和方向能够用来进行各向异性参数估计和裂缝特征的描述。宽方位角数据时差分析的一个关键问题是要将各向异性和横向非均匀性(如速度梯度、倾斜界面、速度透镜体)对反射波旅行时的影响进行区分。Grechka 和 Tsvankin 等<sup>[30]</sup>进行水平层状介质中关于横向速度变化的动校正时差椭圆的数据处理研究,他们提出了一个针对方位时差反演的完整的处理流程指出,在 Powder River 盆地(美国怀俄明州),用这种方法产生的纵波动校正时差椭圆的方向与随深度变化的裂缝倾向有很好的相关性。实践证明,在许多其他勘探区域纵波方位时差分析在预测主要裂缝方向上也十分有效。Jenner<sup>[31]</sup>提出了一种估算动校正时差椭圆的追踪对比方法,该方法表明,在加拿大的 Weyburn 油田动校正时差速度显示的快波方向与快横波的主要裂缝走向和极化向量的方向是一致的;这说明油田地下介质的对称性是具有水平对称轴的横向各向同性介质(TI with horizontal axis, HTI)或正交的。

由于纵波动校正时差椭圆只包含介质参数的3种组合,因此它对裂缝物理性质的反演就存在不确定性。通过分离横波、非双曲线型时差或其他信息(振幅、钻孔),这种不确定性就能得到减小。例如,通过带有先验条件的纵波和横波动校正时差椭圆的联合反演就有助于建立正交、单斜的速度模型<sup>[32-33]</sup>。

Sena<sup>[34]</sup>是认识到应该将非双曲线反射时差应用于各向异性参数估计中的最早人之一,在 Byun 等<sup>[35]</sup>的“倾斜”双曲线时差公式的基础上,他提出了针对多层、弱各向异性介质的旅行时解析表达式。Tsvankin 和 Thomsen<sup>[36]</sup>以及 Alkhalifah 和 Tsvankin<sup>[37]</sup>的广义非双曲线时差方程精确表示了方位各向异

性介质中传播距离长、宽方位角的纵波旅行时,其最初是针对 VTI 介质。Vasconcelos 和 Tsvankin<sup>[38]</sup>针对水平层状正交介质提出了时差反演算法,该算法的理论基础是对 Alkhalifah-Tsvankin 方程的扩展。宽方位角资料的非双曲线时差反演不仅是一种很有前景的裂缝表征技术,而且有助于纵波时间成像和层状正交介质的几何扩散校正。

利用旅行时或者速度随方位角变化的特性可以为自然裂缝以及倾斜的 TI 介质的检测提供有用的信息。而要进行方位各向异性的分析,则要求宽方位地震数据的采集。目前对于宽方位陆上资料的方位各向异性处理手段已经有了一定的发展,而随着技术的提高,现在可以得到高品质的大方位角三维海上数据,这无疑会促进处理方法的进一步发展。此外,随着认识的提高,人们不再满足于 HTI 介质以及 TTI 介质模型,因为它们对于野外实际情况的描述还是过于简单,未来将会把速度分析和偏移算法推广到更为贴近实际的正交介质模型,甚至于具有倾斜对称轴的正交各向异性模型。当然各向异性模型的复杂必将带来速度分析的困难,对计算机能力要求较高的各向异性全波形反演是有潜力解决此问题的研究方向。

## 2.2 能量各向异性研究

振幅随入射角的变化(经常被称为 AVO,振幅随偏移距的变化)或方位角的分析经常用到油藏描述中,AVO 分析能比旅行时方法获得更高的垂直分辨率。AVO 的理论基础是描述平面波在水平分界面上反射和折射的 Zoeppritz 方程。随着地震资料采集、处理和解释水平的提高,AVO 技术从以前传统的含气砂岩的分析进入到寻找裂缝走向和裂缝密度的各向异性研究中。

平面波反射系数的精确表达式即使对各向同性介质都显得十分繁琐,因此很少被用在处理上。然而 VTI 介质和正交介质的对称面的精确反射系数仍然可以设法得出<sup>[39-40]</sup>,因为对于较低对称性,可以使用简化处理等一些计算方法。弱各向异性的线性近似方便了关于各向异性反射率的研究,在形式上减少了自由参数的个数。VTI 介质中纵波反射系数的模拟取决于垂直纵波和横波速度、密度以及参数  $\delta$  和  $e^{[41-43]}$ 。虽然  $\delta$  的影响使得 AVO 梯度产生了畸变,但是纵波的 AVO 图像在各向同性介质和 VTI 介质中大体上是相同的,这也使得 5 个独立参数的振幅反演更加复杂。事实上,正如 de Nicolao<sup>[44]</sup>指出的那样,只有两个参数能够从各向同性反射系数中解出来。

分析振幅的方位变化,特别对于天然裂缝性油藏(如致密气藏和致密油藏),有希望预测出主要裂缝的走向<sup>[45-46]</sup>。HTI 介质和正交模型对称面以及任意各向异性的线性纵波反射系数分别由 Vavryčuk 和 Pšenčík<sup>[47]</sup>和 Rüger<sup>[48]</sup>推导出来。然而,参数确定的非唯一性会影响这些数值表达式在定量 AVO 反演中的应用。最通常的方法还是寻求 AVO 梯度<sup>[49-50]</sup>随方位的变化(与椭圆相近)。对于 HTI 和正交介质,AVO 梯度的极值存在于模型的正交垂直对称面上。如果方位各向异性是由一

组垂直裂缝引起的,那么最大 AVO 梯度就可能与裂缝平行或者垂直,通常就会导致裂缝方位角产生 90°的不确定性。尽管如此,随方位角变化的纵波 AVO 响应已经被成功地应用于判断主要裂隙的走向和对强烈压裂情况的预测。例如,Hall 和 Kendall 指出,Valhall 油田中最小 AVO 梯度的方向与相关分析推出的断层方向具有较好的一致性。

对于只有单一裂缝系统的 HTI 和正交介质,对称面 AVO 梯度之间的差别与裂缝密度(接近于横波分裂参数)呈比例,而且还依赖于裂隙充填物。因此,即使是对于裂隙性质中纵波 AVO 梯度如此简单的反演模型通常也存在非唯一性。原则上说,通过结合纵波 AVO 响应和 NMO 椭圆就能够对裂隙的密度和饱和度加以限制,但是这种方法只能适用于相对较厚、非均匀性弱的油藏。当出现多种解析组合以及目标反射界面两侧均存在裂隙时,就会引起更复杂的因素。对现实中裂缝型油藏,在方位 AVO 分析中应用多分量数据是十分有用的。特别地,Jilek 提出了一种解决 TI 和正交介质中结合宽方位角纵波 PP 和转换波 PS 反射非线性反演的方法。

还有一种有趣的研究思路是将方位角 AVO 和衰减分析结合起来。这能够帮助消除 HTI 介质中裂隙走向估计的不确定性<sup>[51]</sup>。此外,体波衰减系数对各向异性 and 裂隙十分敏感,因此有可能提供关于裂缝特性的有用信息<sup>[52-55]</sup>。另一方面,在某些情况下随方位角变化的衰减会影响到 AVO 分析。为了从频率域反射振幅估算随偏移距和方位角变化的层间衰减,Behura 和 Tsvankin 以及 Reine 提出了一种结合速度分析的有效方法。

进行 AVO 分析的目的是为了计算目标界面的平面波反射系数。然而,所记录的反射波振幅还收到激发和接受的方向性,几何扩散等传播因子,透射系数以及衰减等因素的影响<sup>[56-57]</sup>。上覆岩层中各向异性地层对地震波能量的聚焦或散焦与光学镜片类似,因此它会使得振幅沿波前的分布发生扭曲,从而使几何扩散产生明显的角度变化。在这种情况下,要对基于方位角的反射系数进行有效分析,就需要进行各向异性几何扩散校正。时间-空间域的几何扩散与光束的汇聚或发散有关,因此扩散结果可以直接利用旅行时的空间倒数计算求得<sup>[58]</sup>。这一射线理论的结果被 Ursin 和 Hokstad<sup>[59]</sup>用以对水平层状 VTI 模型进行基于时差的几何扩散校正,并被 Xu 和 Tsvankin<sup>[60]</sup>进一步扩展到方位各向异性介质中的宽方位角、大偏移距的纵波和转换波数据。特别地,在相对较厚的裂缝型油藏底部的方位 AVO 分析中,这种校正被证明是非常重要的。

目前的研究表明,虽然通常地下介质出现弱各向异性,但是会对地震资料造成比较大的影响。在纵波方位各向异性的 AVO 研究中,它的影响与同性介质中“流体”和“岩性”的影响相当。可以预见,将来能量研究的重点是对振幅特征的理解运用上,包括对衰减的研究。实验数据显示,能量对各向异性的敏感度比速度强,尤其是对于含流体的裂缝研究。因此,

能量的各向异性研究会为储层特征描述提供很大的帮助。

### 2.3 其他检测裂缝的方法研究

纵波资料丰富,处理解释手段成熟以及利用方便是其优点,但对于检测裂缝的资料也有一定的要求。首先目的地层的成层性好而且地震资料质量较好才有可能达到预期的效果,对于复杂的碳酸盐岩储层,预测能力有限。其次对于采集的要求较高,近偏移的处理分析得不到有效的各向异性效果,所以观测系统的排列长度要大,最大偏移距与目的层埋深的比值最好在 1.2 以上。纵波检测裂缝的方法还有待进一步的提高,而裂缝预测的课题越来越受到人们的重视,国外的学者尝试用更多的手段进行此项研究。

首先是多波技术。相对于纯纵波资料来说,多波资料对裂缝的敏感程度更强。横波在通过各向异性介质时会产生横波分裂,纵波勘探会接收到转换波信息。利用这些信息来反演裂缝参数也是重要的裂缝预测方法。但是采集时要获得多波多分量数据,施工的成本很高。其次是基于测井数据约束波阻抗反演的地震测井处理一体化的综合技术,这是用地震数据解决地质问题的一种比较成熟方法。这种方法也要求地震资料的质量较好,子波和地层横向变化较小,实用于井资料丰富地区。再次,很多学者使用正演模拟的手段进行裂缝各向异性的研究。3D 大数据量的数值模拟多使用等效介质理论,虽然参数设计方便但是无法很好地模拟实际裂缝的发育情况,对于这一点,物理模型有其优势,物理模拟研究更接近于实际数据。然而裂缝的制作工艺和大型模型的制作成本都是物理模拟必须解决的问题。此外,分形几何学被应用于地球物理研究中,形成了一种非线性裂缝预测的方法。这种方法更偏向于一种纯数学方法,侧重于对较大断裂的识别。最后还有学者尝试利用相干数据体和边缘检测的方法进行研究。相干体方法和边缘检测都是对地震数据体中的特殊异常值进行分析,检测裂缝。和上种方法类似,也是对于大裂缝敏感,无法进行微裂缝的研究。

### 3 结论

本文介绍的裂缝分析的方法不只是局限在裂缝检测中使用,可以将它们推广到整个各向异性勘探的研究中。虽然国内在此方面的研究起步较晚,但是国内学者已经认识到各向异性研究的重要性。国外同行在此领域的研究有很多值得学习和借鉴之处。

#### 参考文献 (References)

- [1] Helbig K, Thomsen L. 75+ years of anisotropy in exploration and reservoir seismics: A historical review of concepts and method [J]. *Geophysics*, 2005, 70(6): 9-23.
- [2] Thomson W. Elements of a mathematical theory of elasticity, Part 1, On stresses and strains [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1856, 146(21): 481-498.
- [3] Christoffel E B. Über die fortpflanzung von Stossen durch elastisch feste

- Korper [J]. *Annali di Matematica*, 1877, 8: 193-243.
- [4] Rudzki M P. Parametrische darstellung der elastischen welle in anisotropen medien [M]. Cracovie: Imprimerie de l'Université, 1911: 503-536.
- [5] Love A. A treatise on the mathematical theory of elasticity [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1892.
- [6] Bruggeman D A D. Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen Substanzen [J]. *Annalen der Physik*, 1935, 416(7): 636-664.
- [7] Crampin S. Seismic wave propagation through a cracked solid: Polarization as a possible dilatancy diagnostic [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1978, 53(3): 467-496.
- [8] Gupta I N. Premonitory variations in S-wave velocity anisotropy before earthquakes in Nevada [J]. *Science*, 1973, 182(4117): 1129-1132.
- [9] Gupta I N. Premonitory seismic wave phenomena before earthquakes near Fairview Peak, Nevada [J]. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union*, 1975, 65(2): 425-437.
- [10] Crampin S. A review of wave motion in an anisotropic and cracked elastic media [J]. *Wave Motion*, 1981, 3(4): 343-391.
- [11] Crampin S. Shear-wave polarizations: A plea for three-component recording [C]//53rd Annual International Meeting. California: SEG, 1983: 425-428.
- [12] Crampin S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting [J]. *Geophysics*, 1985, 50: 142-152.
- [13] Crampin S. Calculable fluid-rock interactions [J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156(3): 501-514.
- [14] Crampin S, Peacock S. A review of shear-wave splitting in the compliant crack-critical anisotropic earth [J]. *Wave Motion*, 2005, 41(1): 59-77.
- [15] Danbom S, Domenico N. Shear-wave exploration [M]. California: SEG Geophysical Developments 1, 1987.
- [16] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks [J]. *Geophysical Journal International*, 1981, 64(1): 133-150.
- [17] Hudson J A. A higher order approximation to the wave propagation constants for a cracked solid [J]. *Geophysical Journal International*, 1986, 87(1): 265-274.
- [18] Thomsen L. Weak elastic anisotropy [J]. *Geophysics*, 1986, 51(10): 1954-1966.
- [19] Wang Z. Seismic anisotropy in sedimentary rocks, part 2: Laboratory data [J]. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1423-1440.
- [20] Tsvankin I. Anisotropic parameters and P-wave velocity for orthorhombic media [J]. *Geophysics*, 1997, 62(4): 1292-1309.
- [21] Grechka V, Tsvankin I. 3-D description of normal moveout in anisotropic inhomogeneous media [J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 1079-1092.
- [22] Mensch T, Rasolofosaon P. Elastic-wave velocities in anisotropic media of arbitrary symmetry - generalization of Thomsen's parameters epsilon, delta and gamma [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 128(2): 43-64.
- [23] Grechka V. Parameter estimation in orthorhombic media using multicomponent wide-azimuth reflection data [J]. *Geophysics*, 2005, 70(2): D1-D8.
- [24] Zhu Y P, Tsvankin I. Plane-wave propagation in attenuative transversely isotropic media [J]. *Geophysics*, 2006, 71(2): T17-T30.
- [25] Zhu Y P, Tsvankin I. Plane-wave attenuation anisotropy in orthorhombic media [J]. *Geophysics*, 2007, 72(1): D9-D19.
- [26] Eshelby J D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems [J]. *Proceedings of the Royal Society*,

- 1957, 241(1226): 376–396.
- [27] Bristow J R. Microcracks and the static and dynamic elastic constants of annealed and heavily cold-worked metals [J]. *British Journal of Applied Physics*, 1960, 11(2): 81–85.
- [28] Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces[J]. *Journal of Acoustical Society of America*, 1980, 68(5): 1516–1521.
- [29] Grechka V, Tsvankin I. 3-D moveout inversion in azimuthally anisotropic media with lateral velocity variation: Theory and a case study[J]. *Geophysics*, 1999, 64(4): 1202–1218.
- [30] Grechka V, Tsvankin I, Cohen J K. Generalized Dix equation and analytic treatment of normal-moveout velocity for anisotropic media[J]. *Geophysical Prospecting*, 1999, 47(2): 117–148.
- [31] Jenner E. Azimuthal anisotropy of 3-D compressional wave seismic data, Weyburn field, Saskatchewan, Canada [D]. Colorado: Colorado School of Mines, 2001.
- [32] Grechka V, Contreras P, Tsvankin I. Inversion of normal moveout for monoclinic media[J]. *Geophysical Prospecting*, 2000, 48(3): 577–602.
- [33] Grechka V, Mateeva A, Franco G, et al. Estimation of seismic anisotropy from P-wave VSP data[J]. *The Leading Edge*, 2007, 26(6): 756–759.
- [34] Sena A G. Seismic traveltimes equations for azimuthally anisotropic and isotropic media: Estimation of interval elastic properties [J]. *Geophysics*, 1991, 56(12): 2090–2101.
- [35] Byun B S, Corrigan D, Gaiser J E. Anisotropic velocity analysis for lithology discrimination[J]. *Geophysics*, 1989, 54(12): 1564–1574.
- [36] Tsvankin I, Thomsen L. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media[J]. *Geophysics*, 1994, 59(8): 1290–1304.
- [37] Alkhalifah T, Tsvankin I. Velocity analysis for transversely isotropic media[J]. *Geophysics*, 1995, 60(5): 1550–1566.
- [38] Vasconcelos I, Tsvankin I. Nonhyperbolic moveout inversion of wide-azimuth P-wave data for orthorhombic media[J]. *Geophysical Prospecting*, 2006, 54(5): 535–552.
- [39] Daley P, Hron F. Reflection and transmission coefficients for transversely isotropic media [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1977, 67(3): 661–675.
- [40] Rüger A. Reflection coefficients and azimuthal AVO analysis in anisotropic media[M]. USA: Society of Exploration Geophysicists, 2002.
- [41] Banik N C. An effective anisotropy parameter in transversely isotropic media[J]. *Geophysics*, 1987, 52(12): 1654–1664.
- [42] Thomsen L. Weak anisotropic reflections [C]/Castagna J, Backus M. Offset dependent reflectivity. SEG, 1993: 103–114 .
- [43] Rüger A. P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry [J]. *Geophysics*, 1997, 62(3): 713–722.
- [44] de Nicolao A, Drufuca G, Rocca F. Eigenvectors and eigenvalues of linearized elastic inversion[J]. *Geophysics*, 1993, 58(5): 670–679.
- [45] Mallick S, Frazer L N. Reflection/transmission coefficients and azimuthal anisotropy in marine seismic studies[J]. *Geophysical Journal International*, 1991, 105(1): 241–252.
- [46] Gray F D, Roberts G, Head K J. Recent advances in determination of fracture strike and crack density from P-wave seismic data [J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(3): 280–285.
- [47] Vavryčuk V, Pšenčík I. PP-wave reflection coefficients in weakly anisotropic elastic media[J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 2129–2141.
- [48] Rüger A. Variation of P-wave reflectivity with offset and azimuth in anisotropic media[J]. *Geophysics*, 1998, 63(3): 935–947.
- [49] Gray F D, Todorovic-Marinic D. Fracture detection using 3D azimuthal AVO[J]. *CSEG Recorder*, 2004, 29: 5–8.
- [50] Hall S, Kendall J M. Fracture characterization at Valhall: Application of P-wave amplitude variation with offset and azimuth analysis to a 3-D ocean-bottom data set[J]. *Geophysics*, 2003, 68(4): 1150–1160.
- [51] Clark R A, Benson P M, Carter A J G, et al. Anisotropic P-wave attenuation measured from a multi-azimuth surface seismic reflection survey[J]. *Geophysical Prospecting*, 2009, 57(7): 835–845.
- [52] Chapman C. Fundamentals of seismic wave propagation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [53] Chapman C. The influence of abnormally high reservoir attenuation on the AVO signature[J]. *The Leading Edge*, 2005, 24(11): 1120–1125.
- [54] Zhu Y P, Tsvankin I, Dewangan P, et al. Physical modeling and analysis of P-wave attenuation anisotropy in transversely isotropic media [J]. *Geophysics*, 2007, 72(1): D1–D7.
- [55] Chichinina T, Obolentseva I, Gik L, et al. Attenuation anisotropy in the linear-slip model: Interpretation of physical modeling data [J]. *Geophysics*, 2009, 74(5): WB165–WB176.
- [56] Martinez R D. Wave propagation effects on amplitude variation with offset measurements: A modeling study [J]. *Geophysics*, 1993, 58(4): 534–543.
- [57] Maultzsch S, Home S, Archer S, et al. Effects of an anisotropic overburden on azimuthal amplitude analysis in horizontal transversely isotropic media[J]. *Geophysical Prospecting*, 2003, 51(1): 61–74.
- [58] Vanelle C, Gajewski D. Determination of geometrical spreading from traveltimes[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 54(3–4): 391–400.
- [59] Ursin B, Hokstad K. Geometrical spreading in a layered transversely isotropic medium with vertical symmetry axis [J]. *Geophysics*, 2003, 68(6): 2082–2091.
- [60] Xu X, Tsvankin I. Moveout-based geometrical-spreading correction for PS-waves in layered anisotropic media [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2008, 5(2): 195–202.

(责任编辑 刘志远)

## 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。