

开发地震技术及进展

冯 魁¹ 张晓帆¹ 陈 川¹ 冯新生²

(1. 新疆大学资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 胜利油田滨南采油厂,山东 滨州 256606)

摘 要:地震技术经过多年的发展,已经成为寻找石油和天然气的重要手段,并且正逐步向油气开发及生产领域渗透。出现的新技术主要包括 3D 地震、垂直地震剖面、井间地震、时间推移地震、多波多分量地震、微地震检测、随钻地震等新技术。这些技术在国内各油田日益受到重视,在应用中取得了较好效果,为油田增储上产做出了重要贡献。对地震技术的形成过程作了简单回顾并着重对开发地震技术进行了介绍和归纳,同时对今后的发展方向进行了探讨。

关键词:地震勘探;三维地震;垂直地震剖面;井间地震;时间推移地震;多波多分量地震

人工地震技术经过多年的发展,已经取得了巨大的进步。随着油气藏勘探开发的不断深入,地震技术不断向油气田开发领域延伸,其概念与内涵也随着各种技术的发展与应用不断趋于完善,地震技术已经成为油气田勘探、开发与生产的一种重要技术手段。本文通过回顾地震技术的形成过程,着重对开发地震技术进行介绍和归纳,并对今后的发展方向进行探讨。

1 地震技术发展历史回顾

地震勘探始于 19 世纪中叶。1845 年, R·马利特曾用人工激发的地震波来测量弹性波在地壳中的传播速度。这可以说是地震勘探方法的萌芽。在第一次世界大战期间,交战双方都曾利用重炮后坐力产生的地震波来确定对方的炮位。

反射法地震勘探最早起源于 1913 年前后,但当时的技术尚未达到应用的水平。反射地震波理论认为,地球内部产生的声波脉冲向地层内部传播,在入射到上下地层弹性有差异的地层界面处产生反射波,在地面可接收到反射波信号。1921 年, J·C·卡彻将反射法地震勘探投入实际应用,在美国俄克拉荷马州首次记录到人工地震产生的清晰的反射波。1930 年,通过反射法地震勘探工作,在该地区发现了 3 个油田。从此,反射法进入了工业应用阶段^[1,2]。

自从反射波法地震勘探在油气勘探业应用以来,地震勘探技术始终处于不断改进之中。但在地震勘探技术发展的最初阶段,主要以光点地震、模拟地震以

及二维数字地震等简单的勘探技术为主。这段时期,地震勘探的主要任务是进行构造勘探。近几十年来,随着地震数据采集方法和装备的改进、数据处理技术的提高和解释方法的发展,利用地震资料不仅能确定地下构造形态、断裂分布,而且能了解地层岩性、储层厚度、储层参数,甚至能直接指示地下油气的存在。地震资料同测井、岩芯资料以及其他地下地质资料相结合,能对油藏进行描述和监测。地震技术已远远超出了石油勘探领域,正向石油开发和生产领域渗透^[3,4]。

2 开发地震技术及其进展

开发地震术语较多,国外有称开采地球物理 (Production Seismology)、开发与生产地球物理 (Development and Production Geophysics, 简称 D & P)、油藏地球物理或储层地球物理 (Reservoir Geophysics) 及开发地震 (Development Seismic)。开发地震、开发与生产地球物理、开发 (开采) 地球物理是同一概念,它的涵义是利用油藏地球物理方法来解决开发中的问题,可以理解为开发阶段的油藏地球物理学。从目前开发地震应用和发展来看,开发地震逐步取代了油藏地球物理名词,研究内容涉及储层预测、油藏描述、开发监测各过程。因此,开发地震是在勘探地球物理学的基础上,充分利用针对油气藏的观测方法和信息处理技术,结合钻井、地质和油藏工程等多学科资料,在油气田开发过程中对油气藏做出完整描述和动态检测的一门新兴学科^[5]。

开发地震技术,主要包括三维地震(3D)、垂直地震剖面、井间地震、微地震检测、随钻地震、时间推移地震、多波多分量地震等新技术。

2.1 三维地震

20 世纪 70 年代中期,在地震勘探中出现了三维地震,它可用于研究三维空间中地质体的几何形态。三维地震是针对二维地震中存在的问题发展起来的。由于二维地震没有横向倾角的实际资料,作图时靠相近剖面的对比,因而往往造成不肯定的甚至完全错误的解释。同时,二维偏移,不能消除剖面上的侧面波。在构造复杂地区,一条测线上不仅记录其垂直于反射平面的波,而且还记录到只要符合反射定理的不同方向的侧面波。这种波如不归位到真正的位置上去,在记录上与反射波相干涉,造成一种难以解释的干涉图象,甚至会得出错误的结论^[6-7]。

三维地震是进行面积采集,采用面积观测系统。其排列长,检波点多,地震道至少应在 200 道左右,还必须测量炮点及检波点的坐标及高程。三维地震工作方法具有很大的灵活性,适合各种地形、地物条件^[8]。

随着岩性勘探的不断深入,人们对地震数据的精度和纵、横向分辨率要求越来越高,这促进了高精度三维地震技术的发展。高精度三维地震技术,Western GE Co 公司称之为“Q-land 技术”,PGS 公司称其为 HD3D 技术。其特点是单位面积内检波点、炮点有足够密度,记录的波场连续、不失真,为后续的处理提供了更多的选择,为叠前地震属性分析和反演提供了资料保障,它可以提高数据的分辨率和保真度,提高对小断层、岩性尖灭等识别的可靠性。目前,国外三维地震面元已达到 $12.5\text{ m} \times 12.5\text{ m}$,PGS 在泰国海湾获得的地震剖面主频高达 150 Hz。此外,数字检波器和 24 位地震仪的出现进一步推动了高精度三维地震技术的发展。与此同时,高精度三维地震技术在我国也进行了一些试验,取得了非常好的效果,如吉林扶余油田通过高精度三维地震技术使得地震资料品质大幅提升,带动了老油田扩边的巨大成功;长庆苏里格气田高精度数字检波器采集使处理后的道集资料得到质的飞跃,为叠前地震资料的挖潜工作奠定了基础。但与国外高精度三维地震相比,国内高精度三维地震面元偏大,仍以 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 为主,有待进一步提高^[9]。

2.2 垂直地震剖面技术

垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profiling, 简称 VSP) 技术是目前迅速发展起来的地球物理勘探新技

术之一,它是相对地面地震剖面而言的,是在地震测井方法的基础上发展起来的。这种方法是在地表设置震源,在井内安置检波器接收地震波,即在垂直方向观测人工波场,对所得资料经过校正、叠加、滤波等处理,得到垂直地震剖面^[10]。

该方法始于上世纪 30 年代,限于各种条件,直到 70 年代才得以发展。1971 年苏联科学院加尔彼林院士发表了“垂直地震剖面”的专著,为该方法的应用和发展奠定了基础,后为欧美国家所引进^[11]。

VSP 技术在我国也已成功地用于开发领域,如辽河油田利用 VSP 资料与地面地震资料相结合准确预测了潜山顶面,误差仅为 5 m;长庆油田、新疆油田、大庆油田、吉林油田、塔里木及四川等油田利用 VSP 资料对重点探区的地震剖面进行了速度校正和层位标定,取得了良好效果。大庆和辽河油田还通过三维 VSP 试验,获得了高分辨率的地震资料,刻画了井周边的断层和地层的分布,为油气藏滚动开发奠定了基础。2004 年还在长庆苏里格地区开展了 3C(三分量)三维 VSP 试验,进一步拓宽了人们对三维 VSP 的认识^[12,13]。

国内外的实际资料证明,垂直地震剖面除了用于改善常规构造解释外,还可以用于测定平均速度、衰减系数、纵横波速度、识别多次波、提高分辨率、进行地层岩性的研究^[14]。

2.3 井间地震

井间地震是井中地震学的重要组成部分,它是将震源与检波器都置入井中进行地震波观测的新型物探方法。由于避开了地表低速带对地震信号高频成分的吸收,因此利用它可以获得极高分辨率的地震信号,由此可以得到井间地层、构造、储层等地质目标的极为精细的成像。将它所提供的丰富的超高频纵、横波资料与其他资料综合研究,可以解决薄互层、储层连通性、流体分布、注气效果、压裂效果等复杂的油藏地质问题。在油田开发阶段,井间地震将发挥重要的储层静态描述与动态监测的作用。它在地面三维或四维高分辨率地震与测井、油藏地质之间搭起一座相互联系的桥梁。开展井间地震这方面的科研攻关,不仅为我国开发程度高的老油田提高采收率、增储上产提供全新的资料,而且可以高水平的硬、软件提供更广阔领域的复杂地质体成像服务^[15]。

井间地震测量原理于 1917 年首次提出,在 60 年代末这种方法被移植到油气勘探领域,1972 年美国《地球物理》杂志报道了首次井间地震方法在油田上的试验。20 世纪 80 年代初,美国石油界率先将层析成像

技术移植到油气勘探开发方面,提出了“井间地震”的基本原理与方法。80年代末,美国的井间地震技术投入使用,主要用于监测稠油层中蒸汽或CO₂前缘位置和油气运移方向,确定小构造、小断层与砂岩体,研究储层横向连通性等。目前,美国的井间地震已进入稳步发展的阶段,井间地震已从简单的二维逐步走向三维、四维(时延井间地震)^[16]。

总体上看,目前国外井间地震技术已达到如下的水平和能力:(1)能够对井间储层作高分辨率监测;(2)分辨率达到地面常规地震的10~100倍;(3)可得到二维、三维和四维的井间储层信息;(4)提供深度域的数据,可以直接与测井资料相对比,是井资料与地面地震资料结合的桥梁;(5)已形成一套完整的工作流程和技术系统,能提供商业性的服务^[17]。

在我国,“七五”期间一些大学与研究机构已开始井间地震的理论研究。自1992年起,我国胜利、辽河等油田相继开展井间地震研究工作。1994年,胜利油田利用自己研制的采集设备与处理软件,在草桥油田稠油开发区进行了一对深井的井间地震采集与处理工作,第一次取得了井间纵、横波速度层析剖面与井间纵、横反射波成像剖面。可以清楚地显示井间最小厚度为6m的砂岩层以及砂岩的尖灭。纵、横波速度比剖面在井眼处与声波测井曲线几乎完全吻合。反射成像剖面给出了测井段上下的高分辨率资料,其主频为80~100Hz,结合波形变化可分辨10m厚的薄层,并发现了井间的小断层与轻微的角度不整合。此后,吉林油田也在物探局帮助下,进行井间地震的实验,同样取得了较好的成果^[18-20]。

2.4 微地震监测

微地震监测技术是20世纪90年代发展起来的一项新技术,它通过观测、分析生产活动中所产生的微小地震事件来监测生产活动的影响、效果及地下状态的地球物理技术。与地震勘探相反,微地震监测中震源的位置、发震时刻、震源强度都是未知的,确定这些因素恰恰是微地震监测的首要任务^[21]。

微地震监测的基础是声发射学和地震学。声发射是指材料内部应变能量快速释放而产生的瞬态弹性波现象,又称Kaiser效应,它是利用微地震监测技术估计地下岩层中地应力大小的理论基础。国外这方面的研究开展得很早也很广泛,1975年德国举办了第1届“地质构造和材料中的声发射/微地震活动”会议。目前微地震监测技术的研究已从简单的震源定位转向震源机制和辐射方式方面的深入研究^[22-24]。对于地震震

源机制和辐射方式的研究已久,但是,对微地震监测而言,在进行震源定位的同时如果能知道震源的其他参数,则可以根据这些参数确定更多的信息。例如根据不同类型的岩石、均质度不同的岩石及同类岩石的不同破裂阶段所产生的微地震的事件频率、地震波的频率及波的振幅等特征就可以推断岩石的类型或均质度,从而进行岩性或裂缝预测或进行各向异性分析、地震衰减、频率分析和矢端分析。所以微地震震源机制和辐射方式的研究及其应用仍然是热点,但是国内尚未广泛开展对其应用^[25,26]。

目前微地震监测最主要的应用还是基于震源定位,这方面的技术难题已经基本解决,因此该方面的研究主要是针对现场应用^[27,28]。譬如,根据现场的具体情况对微震监测系统的开发研制,包括传感器、数据采集及存储、传输器件的选型组配技术,整套监测系统的现场布设技术。为客户提供的信息也还仅局限于微震事件发生数量、频度和简单的定位。但是随着对震源参数的不断深入研究和掌握,微地震的应用范围还会进一步扩大。特别是在复杂地质条件下,精细的常规地震勘探所需的成本很大,这时用成本相对低的微地震三分量数据来进行速度建模、岩性分析或提取其他的储层参数很有意义。

2.5 随钻地震

近年来随钻地震技术在国外发展迅速,它利用石油或工程钻探中钻头的振动作为震源进行地震勘探,是一种逆VSP,也称为随钻VSP或钻头地震^[29,30]。

1936年,Weatherly就申请了用顿钻产生的冲击信号对地下构造进行成像的专利,由于受当时科学技术水平的限制,未能得到进一步的发展。大约50年后,随着电子计算机、数字处理技术以及弱信号检测技术的不断发展,美国斯坦福大学Clearbout教授领导的斯坦福勘探计划(SEP)又重新开展了对随钻地震技术的研究。由Marion和Kostov等人实现了用旋转钻头破岩时的噪声作为井下震源,用地面检波器接收的新型井中地震勘探方法^[31,32]。

随钻地震结合了地面地震和井中垂直地震(VSP)的优点,具有不干扰钻井工作、不占用钻井时间、无检波器下井风险、勘探效率高等特点,并能实时预测井筒周围、钻头前方地层的构造细节。

随钻地震技术与传统VSP技术相比具有许多优势,但随钻地震技术也受到了钻井条件的限制。凭借钻头本身巨大的重量,钻头的振动可以看成是一个有力的震源。然而,它的特性随着许多参数的变化而变化,

如钻头的重量、钻头的转速、地层特性、钻头的类型和磨损程度以及钻柱和井底钻管系统(BHA)的几何形状和尺寸等。上述因素的总体效应必定影响到震源信号振幅和频率的变化^[33-35]。

(1) 钻头的类型。目前在进行随钻地震测量时使用较多的钻头是三牙轮钻头,该钻头在旋转时钻头牙齿对岩石产生一个上下振动的冲力,从而达到破岩钻进的作用。这种钻头有利于进行随钻地震的测量。也有使用PDC钻头进行随钻地震测量成功的报道,但PDC钻头在钻柱中几乎不产生轴向振动,不易提取作为参考信号的振动信号。

(2) 震源的变化。因为震源特征依赖于钻井参数、岩性和钻头的状态,并随着深度的变化而变化,这将给VSP处理带来一些困难。

(3) 噪声的干扰。随钻地震测量是在钻井过程中进行测量,因此将受到大量强噪声的干扰,如何在强噪声中检测出弱的有效信息是随钻地震的关键性问题。包括钻柱上参考信号的采集和提取方法,以及地面测线上地震信号的采集和处理方法。

(4) 水平井。目前已有在井斜达 65° 的斜井中进行随钻地震测量的成功应用,但对于更大井斜或水平井的情况,因为受到井壁的影响,随钻地震可能不适用。

2.6 时间推移地震

时间推移地震也称四维地震,是指在一定时间间隔内对同一块油藏进行多次地震勘探。其主要目的在于分析由于注入和开采而造成的储层中流体运动、流体成分变化、流体饱和度变化、压力变化、孔隙度变化和温度变化等油藏特性的变化所引起的地震响应的变化,并由地震响应的变化反演油藏特性随时间的变化^[36,37]。

四维地震是当今世界上正在迅速发展的一项油藏监测新技术,在国外已初步进入商业应用阶段,至少在北海地区已成为一种提高采收率的重要手段。四维地震研究与应用的主要领域也从早期的蒸汽驱向水驱转移,油水体系已成为四维地震的研究重点。水驱四维地震的成功实例有北海的Foinaven油田、Draugen油田、Gannet-C油田和尼日尼亚的Meren油田。在Meren油田,四维地震投资仅占通过四维地震找到剩余油价值的1%。可见,其经济效益是非常高的。现在北海的Foinaven油田与墨西哥湾的Teal South油田都已铺设了永久海底地震检波器,实现了实时采集、实时监测的尝试^[38,39]。

国内四维地震研究起步较晚,目前有针对性的四维地震采集在国内尚未见报道。但为了强化采油而进行的多次采集则有一些例子,如在新疆、二连、辽河、胜利等油田的应用。

近年来,为了提高东部地区地震资料的品质,国内开展了大量二次三维地震采集工作。目前,渤海湾地区二次三维采集面积已占18%。因此,结合国内的实际情况来看,在新资料静态油藏描述的基础上,如何利用好老资料,从而达到动态油藏描述的目的,应成为我们研究的重点。

2.7 多波多分量地震

多波多分量地震(有人称全波地震)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,从而可以获得丰富的地震数据信息。由于增加了横波信息,使储层参数的预测精度有了明显的提高。据国外成功实例表明,与仅利用纵波资料相比,纵、横波联合预测的储层参数与井资料提取的储层参数之间的误差降低了 $1/2 \sim 2/3$ 。此外,由于横波不受流体的影响,所以纵、横波联合预测可以增强流体预测的潜力^[40,41]。

多波多分量地震技术在石油工业中的应用始于20世纪70年代横波地震勘探,由于接收到的纯横波频率偏低、费用高,而未能取得预期效果,从70年代后期到80年代中期,人们对利用纵、横波资料联合提取岩性信息和识别真假亮点的兴趣,以及对由各向异性引起的横波分裂现象的关注,导致了多波研究的第二次浪潮。90年代中后期,海上纵波激发、三分量或四分量接收的转换波技术,使多波勘探进入了第三次发展高潮,并从方法研究开始转入工业化应用阶段。由于海上多波多分量地震采集成本的不断下降,国外越来越多的已知油田采用多波多分量地震技术,并实现了采集、处理和解释的商业化应用^[42]。

近几年,随着对岩性油气藏认识的不断深入和生产需求的不断增加,特别是多分量数字检波器的出现,多波多分量地震勘探技术在我国石油行业也引起了广泛重视。长庆油田西南油气田、大庆油田及胜利油田先后在鄂尔多斯盆地苏里格气田、四川盆地川中和川西北矿区、松辽盆地徐家气田等地开展了二维三分量或三维三分量的工业化试生产,并在实际生产中取得了初步应用效果。但是,与国外多波多分量地震技术相比,国内在岩石物理研究、转换波叠前偏移、转换波解释等方面存在较大差距,使得应用效果还不够突出,影响该技术的推广和应用^[43,44]。

3 新技术展望

油田开发应用的三维地震、时移地震、垂直地震剖面、井间地震等新技术已初步取得成效。作为目前开发地震使用的主要资料——3D地震资料,改善其质量及分辨率是关键。3D技术的发展应从技术上和经济上优化采集设计,降低勘探成本,为开发地震提供必要基础。时移地震需要完善采集方法,降低采集成本,并向时移AVO(振幅随偏移距的变化,亦称6D)方向发展。井间地震需要完善震源问题,研究出性能稳定的井下震源。继续发展3D3C、3DVSP技术。微地震技术的发展近期目标是研制能在施工井中使用的微地震接收仪系统,以及能在现场处理数据的全自动化系统,实时或近时地显现裂缝延伸状况,为大规模应用铺平道路,真正实现对油藏的监控。随钻技术需进一步发展随钻井间观测系统。研究震源描述、偏振分析数据重新定向,辐射模式分析、各向异性效应及层析成像重建等方法,使其成为油藏开发的有效工具^[45,46]。

近几十年是地震勘探技术发展最快的时期。面对越来越大的勘探开发难度,地震勘探技术必将进一步发展,以满足油气勘探开发的需要。

参考文献:

- [1] 长春地质学院,成都地质学院,等编.地震勘探——原理和方法[M].北京:地质出版社,1980.1—20.
- [2] 周绪文.反射波地震勘探方法[M].北京:石油工业出版社,1989.1—10.
- [3] 马在田,徐仲达.石油物探技术的进展[J].地球物理学进展,1993,8(3):29—44.
- [4] 程金箴,李光文.我国石油地球物理勘探技术现状与展望[J].石油地球物理勘探,1990,25(1):1—9.
- [5] 王喜双,甘利灯,易维启,等.油藏地球物理技术进展[J].石油地球物理勘探,2006,41(5):606—613.
- [6] 陈佳梁,胡润苗.高分辨率三维地震勘探隐蔽油气藏的效果.石油地球物理勘探,2005,40(4):451—453.
- [7] 曲寿利.地震勘探技术的发展促进油气勘探新发现——以胜利油田40年地震勘探历程为例[J].石油地球物理勘探,2005,40(3):366—370.
- [8] 唐建仁,崔凤林.高分辨率三维地震技术在油田开发中的应用[J].石油物探,2000,39(1):50—56.
- [9] 邓志强,倪宇东,陈学强,等.复杂山地三维地震勘探采集技术[J].石油物探,2003,38(1):15—22.
- [10] 谢明道.垂直地震剖面应用技术[M].北京:石油工业出版社,1991,1—36.
- [11] 郭建.VSP技术应用现状及发展趋势[J].勘探地球物理进展,2004,27(1):3—8.
- [12] 张公社,宋玉龙,丁伟,等.VSP技术在小断块油气田开发中的应用[J].石油物探,2005,44(4):367—369.
- [13] McGuire D, Runyon S, Williams T, et al. Gas hydrate exploration with 3D VSP technology, North Slope, Alaska[A]. In: Expanded Abstracts of 74th Annual International SEG Meeting[C]. 2004, 2489—2492.
- [14] 严又生,宜明理,魏新,等.三维三分量VSP数据处理方法及效果[J].石油地球物理勘探,2005,40(1):18—24.
- [15] 孙忠勤.井间地震技术[M].北京:石油工业出版社,1999.
- [16] Miller R D. Evolution of a vital tool for reservoir engineers[J]. Seismic Technology, 1999, 51(1):22—28.
- [17] 刘合,王玉普.国外井间地震技术[M].北京:石油工业出版社,1998.1—99.
- [18] 周建宇,何惶华.罗家地区井间地震方法与效果[J].石油地球物理勘探,2001,36(1):745—753.
- [19] 孙秀英,张立新,崔成军,等.辽河油田井间地震试验与研究[J].石油物探,2002,41(增刊):21—24.
- [20] 曾文冲,赵文杰,臧德福.井间电磁成像系统应用研究[J].地球物理学报,2001,44(3):411—42.
- [21] 张山,刘清林,赵群,等.微地震监测技术在油田开发中的应用[J].石油物探,2002,41(2):226—231.
- [22] 刘建中,王春耘,刘继民,等.用微地震法监测油田生产动态[J].石油勘探与开发,2004,31(2):71—73.
- [23] 刘百红,秦绪英,郑四连,等.微地震检测技术及其在油田中的应用现状[J].勘探地球物理进展,2005,28(5):325—329.
- [24] Stork A L, Ito H. Source parameter scaling for small earthquake observed at the Western Nagano 800-m-deep borehole, Central Japan[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2004, 94(5):1781—1794.
- [25] 焦明若,唐春安,张国民,等.细观非均匀性对岩石破裂过程的微震序列类型影响的数值试验[J].地球物理学报,2003,46(5):659—666.
- [26] 尹贤刚,李庶林,唐海燕.岩石破坏过程的声发射特征研究[J].矿业研究与开发,2003,23(3):9—11.
- [27] Maxwell S C, Urbancic T L, Demerling T, et al. Calibrating borehole seismic attributes with passive seismic data[A]. In: Expanded Abstracts of 73th Annual International SEG Meeting[C]. 2003, 2215—2218.
- [28] Raymer D, Ji Y. Genetic algorithm design of microseismic injection-monitoring networks in the Tengiz Field, Kazakhstan[A]. In: Expanded Abstracts of 74th Annual International SEG Meeting[C]. 2004, 548—551.
- [29] Rector J W, Marion B P. The use of drill-bit energy as a downhole seismic source[J]. Geophysics, 1991, 56(5):628—634.
- [30] Rector J W, Hardage B A. Radiation pattern and seismic waves generated by a working roller-cone drill bit[J]. Geophysics, 1992, 57(10):1319—1333.
- [31] Miranda F, Aleotti L, Abramo F, et al. Impact of the Seismic While Drilling technique on exploration wells[J]. First Break, 1996, 14(1):55—68.
- [32] Poletto F, Miranda F. Seismic while drilling use of pilot signals with downhole motor drilling[A]. In: Expanded Abstracts of 68th Annual International SEG Meeting[C]. 1998, 147—150.
- [33] 姜宇东.随钻地震技术综述[J].石油物探,2004,43(2):202—208.
- [34] Bertelli L, Cesare F. Improving the subsurface geological model while drilling[J]. First Break, 1999, 17(6):223—228.
- [35] 张绍槐,韩继勇,朱根法.随钻地震技术的理论及工程应用[J].石

- 油学报, 1999, 20(2): 67—72.
- [36] Watts G F T, Jizba D, Gawith D E, et al. Reservoir monitoring of the Magnus Field through 4-D time-lapse seismic analysis[J]. *Petroleum Geoscience*, 1996, 2(4):361—372.
- [37] 邓怀群, 刘雯林, 王晓琦. 时间推移地震技术[J]. *勘探家*, 1999, 4(3):40—44.
- [38] 陈小宏, 牟永光. 四维地震油藏监测技术及其应用[J]. *石油地球物理勘探*, 1998, 33(6):707—715.
- [39] Gabriels P W, Horvei N A, Koster J K, et al. Time lapse seismic monitoring of the Draugen Field[A]. In: *Expanded Abstracts of 69th Annual International SEG Meeting*[C]. 1999, 2035—2037.
- [40] 黄中玉. 多分量地震勘探的机遇和挑战[J]. *石油物探*, 2001, 40(2):131—137.
- [41] 王光杰, 陈东, 赵爱华. 多波多分量地震勘探技术[J]. *地球物理学进展*, 2000, 15(1):54—61.
- [42] 易维启, 唐宗璜, 宋吉杰. 多波多分量地震勘探在松辽盆地的初步应用[J]. *石油地球物理勘探*, 1998, 33(5):663—670.
- [43] Caldwell J. Marine multi-component seismology[J]. *The Leading Edge*, 1999, 18(1):1274—1276.
- [44] 张晓斌, 李亚林, 唐建侯, 等. 利用多波资料检测裂缝[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(4):431—438.
- [45] 王柄章. 勘探地球物理方法技术的最新进展[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, (4):465—483.
- [46] 杨建礼. 油藏地球物理及其进展[J]. *石油物探译丛*, 1998, (6):1—8.

ADVANCES IN DEVELOPMENT SEISMIC TECHNOLOGY

FENG Kui¹, ZHANG Xiao-fan¹, CHEN Chuan¹, FENG Xin-sheng²

(1. *School of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830000, China;*

2. *Binnan Oil Production Plant, Shengli Oilfield, Binzhou 256606, Shandong Province, China*)

Abstract : Seismic technology achieved a great success in recent years, and has become a key method in oil and gas exploration. Now, seismic technology is focusing on oilfield development area. The new techniques mainly include 3-D seismic, vertical seismic profiling, cross-well seismic, 4-D seismic, multi-wave/multi-component seismic, micro-seismic monitoring and seismic while drilling. These techniques are paid more and more attention in the oilfields in China and have achieved good results in application, which significantly contributed to the increase of reserve and production. The paper reviews the forming process of seismic technology, introduces and summarizes the development seismic techniques, and discusses the developing trend.

Key words : seismic exploration; 3-D seismic; vertical seismic profiling; cross-well seismic; 4-D seismic; multi-wave/multi-component seismic

作者简介: 冯魁(1982—)男, 山东济南人, 硕士, 新疆大学资源与环境科学学院地球探测与信息技术专业, 通信地址: 新疆乌鲁木齐市胜利路14号新疆大学资源与环境科学学院06研, 邮政编码: 830046, E-mail://fengkui19820112@163.com.