

中国石油物探新技术研究及展望

撒利明*^① 董世泰^② 李向阳^③

(^①中国石油天然气集团公司,北京 100007; ^②中国石油勘探开发研究院,北京 100083;

^③中国石油天然气集团公司物探重点实验室,北京 102249)

撒利明,董世泰,李向阳. 中国石油物探新技术研究及展望. 石油地球物理勘探, 2012, 47(6): 1014~1023

摘要 中国石油隶属的物探队伍已成为国际油气勘探中一支不可忽视的力量,陆上综合勘探能力居世界第一。在物探技术全球化、国际化的大背景下,国际竞争日趋激烈,各物探公司均发展自身独有的特色技术,以确保其市场竞争地位。为增强中国石油集团公司物探技术创新能力和国际竞争力,提高前陆、岩性、叠合盆地、深层、非常规等领域油气藏勘探的技术水平和勘探成功率,需要加强九个方面的物探新技术新方法研究,大幅度提高中国石油物探技术整体研发能力,形成解决复杂地质问题的关键技术,提高集团公司核心技术竞争力及主营业务长远发展潜力,为打造技术领先的中国石油物探奠定基础。

关键词 新技术 新方法 技术领先 中国石油物探

中图分类号:P631 **文献标识码**:A

1 中国石油物探队伍经过多年发展已成为国际油气勘探开发中一支不可忽视的力量

我国陆块内部的地质结构复杂,历经多次构造运动,后期改造作用强烈,油气藏具有陆相生油、多期运移、复式成藏等独特的油气地质特点,决定我国的油气勘探开发面临世界级难题。物探技术是近代石油勘探的主要技术,经过60多年的不懈努力,中国的石油物探技术已成为具有中国特色的油气地质勘探理论和方法技术系列的核心内容之一,物探队伍相继为发现玉门、新疆、松辽、塔里木、渤海湾、四川、苏里格等油气田发挥了重要作用,它不仅是我国石油工业的先行开拓者,也是保障油气资源接替的主力军,勘探开发持续发展的推进器^[1]。

近十年来,中国石油集团十分重视物探科技发展,加大重大装备和核心软件研发、攻克山地地震数据采集与处理、复杂油气藏描述技术的研究力度,开展高密度地震数据等前沿技术攻关和现场试验,推动物探技术应用水平不断提高。到“十一·五”末,已具备物探数据采集、处理、解释、重大装备和软件

研发生产、核心技术攻关的综合实力,形成了具有较强竞争力的国际化物探技术服务队伍。

1.1 整体规模处于世界前列

如今,中国石油物探具有专业公司3家、直属院所4家^[2],另有1个国家物探重点实验室和12家油田公司的物探队伍。共有从业人员26000余名,地震采集队伍181支,VSP队10支,非地震队23支,地震仪器164台套,近70万道,新度系数为0.6,处理解释CPU近9万余核。目前,中国石油物探陆地队伍数量全球第一,资产总额排名世界第四^[3]。

1.2 复杂地区技术服务能力世界领先

围绕复杂山地、黄土塬等特殊地表和复杂陆相沉积地层勘探等世界级难题,持续开展提高资料信噪比、成像精度、储层预测效果的一体化物探技术方法攻关,逐步形成了复杂山地、沙漠、黄土塬、过渡带、大型城区、富油气区带等复杂地区的勘探技术及油藏地球物理、综合物化探等8项特色技术系列^[3,4],高密度、多波、四维、井震联合等前沿地震技术已在一些重点试验区初见成效。

现今我国的复杂山地一体化物探技术、黄土塬地震配套技术达到世界领先水平,沙漠区地震配套技术、浅海过渡带地震配套技术、陆上油气富集区地

*北京市东城区东直门北大街9号中国石油大厦集团公司科技管理部,100007。Email:salim@cnpc.com.cn

本文于2012年7月28日收到,最终修改稿于2012年10月15日收到。

震配套技术、综合物化探配套技术具有国际一流的技术水平,大型城矿区地震配套技术、复杂油藏地球物理配套技术具有国际先进水平。

1.3 核心技术研发取得重大进展

“十一·五”期间,中国石油集团持续加大物探科技投资力度,取得了一批重大科技成果并在生产中得到应用,为集团公司的业务发展提供了坚实的技术支撑。

1.3.1 重大装备研制取得突破性进展

成功研发了 ES109 新型地震数据采集记录系统,填补了国内空白;掌握了高速数据传输、站体嵌入式系统开发、主机软件、系统同步四项关键技术,取得了三项技术创新。高速数据传输能力比目前国际主流产品的数据传输能力提高了 2~5 倍^[3],被评为 2009 年中国石油集团十项重大科技进展之一,并成为国务院民口国家重大专项的标志性成果。

成功研发了 KZ-34 大吨位可控震源,能够适应深层、低信噪比地区勘探需要。激发能级由 $1.35 \times 10^4 \text{N}$ (60000lbf) 提高到 $1.8 \times 10^4 \text{N}$ (80000lbf),低频可控震源技术利用 3Hz 低频扫描,取得较好的效果;研究掌握了 ISS、V1、DSSS 可控震源高效采集配套技术;开发了质量监控及数据处理配套软件,提高了陆地地震作业的竞争能力。

1.3.2 地球物理软件达到世界先进水平

GeoEast 地震数据物理解释一体化系统跨国际先进行列。叠前深度偏移处理、单程波叠前偏移技术已投入生产应用,逆时偏移技术功能较为完善,已在国内推广安装 163 台套,CPU 达到 12773 个核。新增海洋数据处理、VSP、叠前反演和属性提取分析等新功能,系统整体性能与国外同类处理系统相当。

GeoMountain 山地地震勘探特色软件,具备复杂山地采集、复杂山地和地下构造数据处理、复杂构造解释、多分量采集处理解释等功能,填补了国内外山地地震勘探专用软件空白,提升了解决复杂山地问题能力。已推广安装 10 余套,在四川、新疆、东北、缅甸和埃及等工区得到了大规模应用。

1.4 超前储备技术研究取得可喜成果

(1)获得了三项基础理论创新:建立了低频岩石物理实验装置,通过实验分析,形成了较系统的致密砂岩岩石物理数据库,建立了致密砂岩经验模型;提出了地震频带最小耦合速度与孔隙度关系模型,

为预测含气性提供了依据;建立了波动方程反演理论体系和优化算法。

(2)获得了四项应用技术突破:在跨频带岩石物理分析基础上,研发了含气饱和度预测技术;自主研发形成了二维波动方程反演和解释技术系列;基于 AVO 的 PG 属性分析,提出了利用 G 属性广谱特征识别流体技术;研发了 GeoEast 四个关键功能模块,形成了多重约束下的偏移速度建模技术,为复杂区地震成像和储层解释提供了重要的技术支撑。

(3)自主研发了四套地震应用软件:包括 Geo_GMES 3.1 地质地球物理资料综合处理解释一体化软件、GeoEast-Lightening 1.0 逆时偏移成像处理软件、“地震采集质量分析评价系统 1.5”版本、Geo-Frac 1.0 地震裂缝综合预测软件。

1.5 市场份额大幅度跃升

在大力实施走出去战略方针指引下,中国石油集团物探国际化服务业务蓬勃发展,国际地震勘探份额已提升至全球第二位,陆地地震采集业务居全球第一,技术装备研发水平和技术创新水平显著提高。

但是,我们应该看到,现今物探技术正在经历一个重要的发展时期,在未来的 3~5 年,物探技术在硬件和软件方面都将迎来快速发展。在硬件方面,深海勘探船、无线采集仪器、陆地可控源电磁等都将很快在生产中得到广泛应用;软件方面,向客户提供一揽子服务,向软件一体化方向发展;各公司的专有核心技术将进入快速发展时期,服务公司则竭尽全力增强自身的技术实力和创新能力,以保持行业领跑者的地位。因此,根据中国石油勘探面临的形势和技术需求,着眼高端,加速解决生产急需的瓶颈技术,快速提升核心竞争力具有重要意义。

2 未来 5~10 年物探技术需求

未来 5~10 年,全球能源需求持续增长,常规、非常规能源勘探方兴未艾,全球勘探开发投资进一步增加,我国宏观经济政策必将大力促进石油天然气发展,物探市场亦将持续稳步增长。

中国石油油气勘探开发的重点集中在“八大盆地、四大领域”,同时,加大深海、深层、非常规等三个新领域的油气勘探,对复杂地表高信噪比采集、高分辨率处理、叠前深度域准确成像、确定性储层预测等

物探技术提出了更高的要求。

2.1 物探的主要任务

在岩性—地层勘探领域,物探的主要任务是预测致密砂砾岩及裂缝型岩性油气藏,识别1~3m厚的砂体,储层预测符合率要达到85%以上。

在前陆勘探领域,复杂构造和深度超过7000m的深层构造是下步勘探主要目标,物探的主要任务是复杂构造准确成像、优质储层预测和圈闭有效性识别,要求构造落实成功率达到80%,构造深度误差和高点平面误差小于2%。

在碳酸盐岩和火山岩勘探领域,物探的主要任务是搞清深层构造,提高礁滩储层和岩溶缝洞储层预测精度,定量雕刻缝洞储层空间展布,开展非“串珠”状储层的识别预测研究。要求深层地震资料的信噪比再提高30%,纵、横向分辨率再提高30%。

在老区勘探领域,物探的主要任务是提高地震资料的信噪比和分辨率,提高地震成像精度和储层识别预测精度。要求地震资料信噪比提高50%以上,在中国东部地区识别落差3~5m的小断块及1~3m厚的岩性储层,在西部地区识别落差5~10m的小断块及3~7m厚的岩性储层,为储量滚动扩边和油气二次开发提供技术支撑。

在大于7000m的深层勘探领域,物探的主要任务是加大排列,探索折射波、回转波的速度建模和成像的潜力。同时,保护低频,提高深层信噪比,提高成像精度。

在深海勘探领域,物探的主要任务是研发相应的观测方法,比如超长拖缆(长于12km)、多层拖缆和洋底接收技术等,进一步提高地震资料的信噪比,既能解决构造问题,又能满足无井情况下的储层预测和烃类检测研究需要。

在非常规页岩气及煤层气勘探领域,物探的主要任务是能识别断距1~3m的断层和厚度1~3m的薄煤层,以及含气页岩层的裂缝密度和发育方向,识别有利储层发育带,预测页岩脆性和含气富集区,为开发水平井、羽状井等设计提供技术支撑。

在油藏开发领域,物探的主要任务是进一步创新油气藏描述技术及研发提高采收率的技术。在当前要特别注意在3D3C、3.5D、4D地震及井震技术基础上研发获得剩余油气分布的综合开发技术。

2.2 物探技术需求

精细勘探和评价开发需要精细物探技术支撑,

精细采集、处理解释一体化、量化储层预测与油气检测是对物探技术发展的总体需求。

2.2.1 地震采集技术需求

鉴于中国特有的陆相沉积、复杂断块、复杂冲断构造、低丰度岩性油气藏等石油地质条件,要求在全频激发、宽频接收基础上,在模型正演指导下,采用较高密度空间采样(20~25m面元)、适当方位角(纵横比为0.5~0.8)、适当覆盖次数(100次以上)、宽频激发和接收的观测系统,提高不同地表条件下原始地震资料的信噪比和分辨率。此外,采集设计要面向地质目标体,向可视化、波动方程正演方向发展,并要求地质目标体属性均匀,包括叠加属性、偏移属性、静校正等。

全数字高密度采集代表了精细采集技术发展趋势,有利于扩展动态范围(大于90dB),提高地震频带宽度,提高深层弱反射信号强度^[5]。多波采集获得的转换波资料有利于缝洞识别、各向异性研究和烃类检测,越来越多地被油公司所采纳,代表了复杂油气水关系的油藏描述技术需求。

2.2.2 处理技术需求

地震资料处理技术随着勘探目标的日益复杂而向“精细、保真”发展。要求解决好静校正、信噪比、分辨率等问题,地震处理要具有更准确清晰的成像,为此要求速度建模真实,波场归位准确,解决好各向异性问题,偏移成像过程中保持波场动力学特征,做到保幅偏移。

此外要进一步完善逆时偏移成像技术、全弹性波方程偏移成像及全波形反演成像技术。这些技术不仅有利于得到精确的全波场速度模型,而且有利于解决复杂构造的屏蔽反射成像,以及适应各向异性和保持振幅的特点,代表了处理技术发展的方向。

2.2.3 解释技术需求

从叠后到叠前是储层地震预测的发展方向,叠前储层预测能够获得目的层波阻抗、泊松比、密度等参数,刻画储层分布,评价储层有效性。

从单一到综合也是地震解释的现实发展方向,从单纯利用纵波到利用多波,从单纯利用地面地震到地面—井筒地震相结合,从单学科到物探、测井、地质、钻井等多学科协同,从单井解释到多井解释,降低解释的多解性。

从定性到非均质性定量描述是储层雕刻技术的发展趋势,发展适应性强、分辨率高的储层物性参数

的定量描述技术,可提高相关油气藏开发成效。

从间接油气检测到直接油气检测,提高流体识别精度,是解释技术发展的趋势之一。

3 物探新技术研究方向及其意义

根据物探科技发展方向测评分析,现今中国石油集团有关复杂区地震采集处理、综合地震地质研究、现场试验新技术处于国内领先水平,山地、黄土塬等差异化地震勘探技术处于国际领先水平,油藏地球物理、深海、深层、物探装备、非常规等技术水平处于中等或偏低水平,是近期发展的重点。

因此,加强岩石地球物理、地震成像及速度建模、储层及流体识别、微地震监测、非常规油气勘探、非均质储层预测、深海、深层、综合物化探等 9 个方面的新技术研究,是增强中国石油集团物探技术创新能力和国际竞争力,提高复杂区油气、接替领域油气勘探技术水平和勘探成功率的关键。

3.1 碳酸盐岩、致密砂岩地震岩石物理分析方法

地震岩石物理研究是建立岩石物理性质和油藏基本参数之间关系的主要途径,在地震数据处理、岩石物理参数获取、定量解释和风险评估等环节发挥重要作用,可有效提高地震岩性识别、储层预测与流体检测的精度和可靠性。地震岩石物理学研究被认为是促进常规地震勘探从定性走向半定量乃至定量的最重要途径,已成为国内外勘探地球物理学研究的热点。

目前,国内地震岩石物理研究的整体水平较低,无论是实验研究、理论模型分析还是实际地震岩石物理应用,基本上处于起步阶段,由于对油藏的地质特征与物理性质之间的关系缺乏科学的定义,复杂储层预测仍然存在诸多问题。在国外,岩石物理作为叠前储层预测的基础,受到油公司和研究机构的广泛重视,已形成一定的理论基础和实验方法。因此,要加强以下四个方面的研究。

一是孔隙流体分布描述与岩石物理测试。采用岩心薄片分析与 CT 成像方法,结合常规物性测试,研究孔隙形状、尺寸、微观流体分布特征(图 1)与渗透率及其对样品岩石物理参数的影响;开展不同频段的岩石物理测试,分析孔隙结构在不同频带对声波速度的影响;开展变饱和度和岩石物理测试,建立不同岩心在地震频带的含气饱和度预测模型。

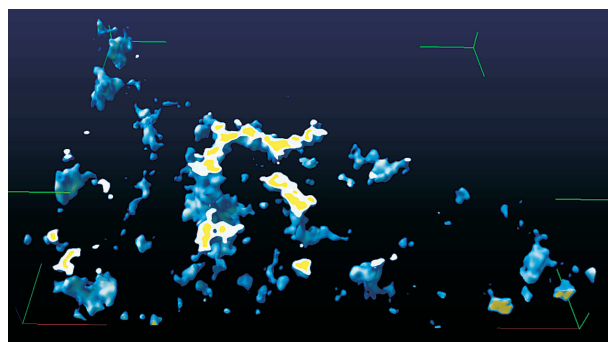


图 1 孔隙流体分布描述——微观孔隙流体 3D 成像(纳米级)

二是非均匀饱和和双重孔隙介质理论研究。以低频测试数据为基础,结合地震属性及正演技术,优化双重孔隙介质波动理论模型;以孔隙结构描述为基础,定义满足最大弛豫的孔隙结构参数,区分两类孔隙压力均衡方式;发展复杂结构双重孔隙介质波传播理论,对含流体的复杂孔隙系统进行速度及衰减定量预测;完善非均匀饱和和介质跨频带纵波速度理论模型。

三是建立复杂孔隙结构储层地震预测模型。基于孔隙结构成像、孔隙成因及分类,定义和揭示不同孔隙结构关键参数,在低频实验基础上,分析孔隙结构对波速的影响,建立地震频带复杂结构储层定量预测模型。

四是地震岩石物理分析及工业化应用。基于岩石物理测试及理论模型,分析地震频带物性及含气性导致的岩石物理参数变化规律,建立定量预测物性和含气性的岩石物理量板,以敏感参数分析为指导,开展致密砂岩和碳酸盐岩岩石物理分析技术应用。

通过以上研究,建立新的地震岩石物理参数预测模板,提供跨频带岩石物理分析方法和流程;形成描述部分饱和和非均质储层地震波传播机理的新理论模型;建立多种跨频带地震岩石物理模型;形成新的地震岩石物理分析技术。使数字化高分辨率表征孔隙结构数据体尺度达到微米级,地震成果预测准确率达到 80%。

3.2 地震成像和速度建模新方法

近几年,叠前深度偏移技术得到广泛应用,已成为地震成像的主导技术,在复杂构造区,逆时叠前深度偏移技术需求急剧上升。如前所述,中国石油在“十一·五”期间已形成了 GeoEast-Lightning 声波逆时偏移成像技术,但是速度建模一直沿用积分法

的建模思路,限制了逆时偏移等先进偏移算法的应用效果。

地震成像是油气藏定位、评价、开发的基础。如今应用常规的单一纵波成像方法既不能精确刻画地下构造信息,也不能充分反演地下岩石参数。为了准确估计地下岩石参数的性质,必须提供弹性波的成像信息。此外,以往的建模只利用地震波的走时信息,存在很大的局限性,为此有必要开展全波形反演研究,利用波形信息反演速度和其他物性参数,建立准确的速度模型。再有就是进一步提高成像和速度建模的精度及计算效率,必须发展相应的 GPU 技术和弹性波方程逆时偏移技术,这些技术是解决复杂地质问题的必然选择。

根据叠前成像技术国内外对标分析,中国石油的偏移成像技术与国外还有较大差距,如图 2 所示。为此,针对山前带、盐下、高陡构造等复杂地质体波动方程深度偏移对精确速度模型的需要,有必要开展基于 GPU/CPU 加速的弹性波正演和频率域和时间域波形反演速度建模计算中的相关问题研究,推动时间域和频率域波形反演的高精度快速计算,完成深度偏移建模,实现复杂构造的精确成像。主要应从以下三个方面入手。

一是声波方程全波形反演速度建模方法研究。完善声波全波形反演技术流程,开展高效声波方程

正演方法、数据相位误差和周期错位分析方法、梯度数据调节处理方法等研究,以提高速度横向变化的适应性,形成全波形反演速度建模系统。

二是弹性波动方程保幅逆时偏移和全波形反演速度建模方法研究。包括基于交错网格和紧致交错网格有限差分技术及其频散压制策略的弹性波方程保幅逆时偏移方法、低波数噪声识别与压制、快速梯度算法弹性波方程时间域全波形速度建模方法、高效迭代快速计算方法、CPU/GPU 并行计算弹性波方程时间域全波形反演方法、弹性波方程频率域全波形速度建模方法、CPU/GPU 弹性波方程逆时偏移、全波形反演加速技术等,从根本上提高偏移和反演的效率,提高弹性波场(纵、横波)成像精度(图 3)。

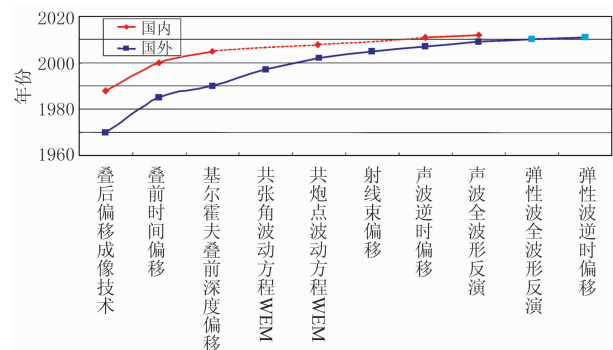


图 2 中国石油偏移成像技术与国外对标
国外弹性波技术刚刚起步

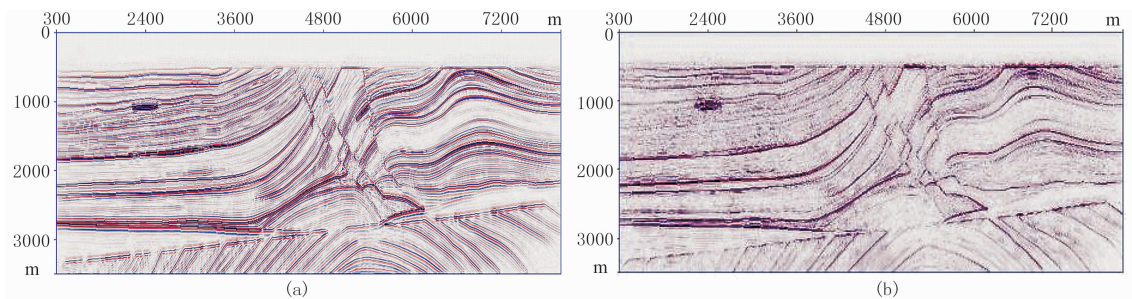


图 3 全弹性波逆时偏移成像 Marmousi 模型测试
(a) 纵波成像结果; (b) 横波成像结果

三是高密度宽方位三维复杂物理模型数据体采集与分析研究。包括高密度、宽方位三维地震物理模型数据体采集与分析、多波二维地震物理模型数据体采集与分析等。通过分析高、低密度数据体对成像精度的影响及宽、窄方位数据体对成像精度的影响,进而分析高密度、宽方位数据体成像精度优势和二维多波数据体成像精度优势。

通过以上研究,形成全波形反演技术,建立三维

弹性波方程逆时保幅偏移方法、三维弹性波方程时间域和频率域全波形速度建模方法,使中国石油的地震成像技术研究水平跨入国际先进行列。

3.3 储层及流体地球物理识别技术

储层物性特征参数控制着油气的空间分布和油气的储量估计,直接影响油气开采方案的设计和采收率,一直是油气勘探开发研究的重点。由于我国复杂油气储层具有储层结构复杂、厚度薄、物性差、

岩性物性高度非均质且横向变化快、储层岩性对比性差、有效储层分布分散等特征,对储层预测及流体检测技术提出了更高要求。

如今,国内外储层物性参数与流体因子估算主要来自基于射线线性近似理论的叠前地震反演获取的弹性参数,估算的储层物性参数与流体因子存在一定的冗余性及不确定性,给油水分布识别带来很大困难。

为了探索新的地震波(微尺度波场信息)的基础理论、观测与敏感参数分析技术,从地震资料中提取能反映储层流体类型的属性参数,为油气增产稳产和裂缝性油气藏预测提供技术支撑,应重点开展以下三个方面的研究。

一是基于声波方程的叠前储层参数反演方法研究及应用。包括基于波动方程的叠前储层物性参数反演理论、基于 GPU/CPU 加速的高效声波方程反演算法、三维声波方程储层参数反演理论与方法、非线性叠前弹性参数反演理论及非线性叠前弹性参数反演算法等,为获得高精度地下复杂介质构造和岩性信息提供保障。

二是基于固液两相解耦近似的流体因子叠前反演方法研究。包括含流体多孔弹性介质地震响应特

征研究、构建固液两相解耦反射特征方程、流体因子叠前地震直接反演方法研究等,以提高流体因子估算的精度和可靠性。如图 4 所示,基于固液解耦方程的敏感流体因子叠前定量反演方法提高了流体预测的可靠性。

三是慢横波及慢纵波流体敏感性分析方法及实验研究。包括不同尺度、不同孔隙度的裂缝人造岩样制作,慢横波测试与敏感参数分析及多尺度岩石物理模型、裂缝性多孔介质的慢纵波测试与敏感参数分析、慢横波信息提取技术等^[6],充分利用慢横波油水速度差异(图 5),准确识别流体中水的分布,进一步提高油水识别精度。

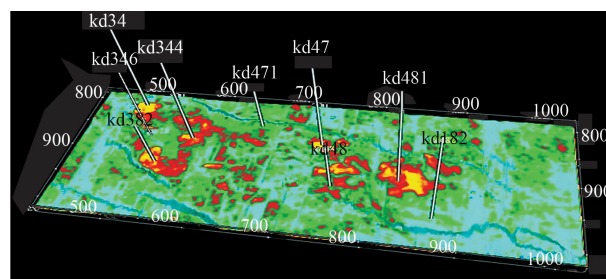


图 4 基于固液解耦方程的敏感流体因子叠前反演结果
敏感流体因子叠前反演很好地指示出岩性油气藏的流体富集区(红色),与该区钻井结果完全符合

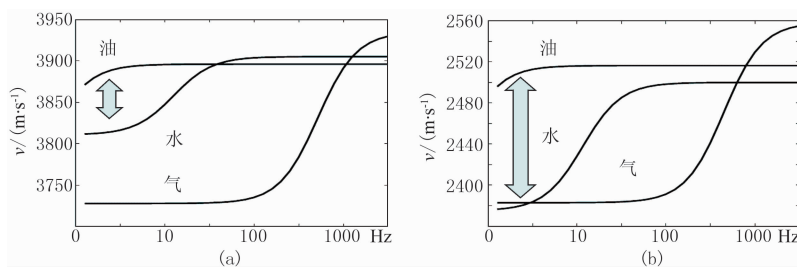


图 5 多相介质纵波及慢横波对于流体敏感性分析

(a)纵波; (b)慢横波

通过以上研究,形成基于三维声波方程的储层参数反演方法;形成固液两相解耦近似的流体因子叠前反演方法和有效的流体识别方法;形成不同黏滞度流体饱和的慢横波敏感性岩石物理模型。为岩性和流体识别技术提供更多可靠的物性参数,使油藏地球物理评价技术得到进一步发展,为我国复杂岩性油气藏勘探开发提供新的有效手段。

3.4 非常规油气地球物理识别新方法

随着我国油气消费需求与日俱增,积极寻找新的接替能源势在必行,加速非常规油气的勘探开发是国家能源安全的需要,在非常规油气方面的勘探

正如火如荼。

我国非常规油气资源分布广泛,包括页岩气、煤层气、致密砂岩气等。我国页岩气资源的开发刚刚起步,经验匮乏,技术不成熟,制约着我国页岩气的发展。页岩气储层具有超低孔渗等特征,页岩气的开发与裂缝发育带有密切关系,致使针对页岩气的地球物理技术如裂缝检测、“甜点”、“脆性”预测等非常困难。煤层气以吸附状态赋存于煤层孔隙内表面,造成煤层气空间分布存在较强非均一性,煤层气在煤层中的主要通道是裂隙网络系统,煤层中的煤岩裂隙、内生裂隙和微裂隙愈发育,则束缚水饱和度和

就愈低,气体相对渗透率就愈高,越有利于煤层气的运移、产出,因此要求地震技术能够预测裂缝,预测煤层气局部富集区,以提高高产井比例,提高勘探开发效益。

常规油气勘探技术不能完全满足煤层气和页岩气勘探开发的要求。以往针对非常规油气藏的地球物理识别与评价方法研究相对较少,迫切需要进行基础理论、方法和技术的研究与试验,形成适合我国地质特点的煤层气和页岩气地球物理勘探配套

技术系列。

国外针对非常规油气资源,开展了非常规储层预测与流体检测方面的研究,初步形成了地震识别敏感参数优选、含气丰度和储层脆性的地震有效识别、微地震压裂检测等技术。图6中分别是页岩岩石脆性预测、裂缝预测和微地震压裂监测结果,可以支撑页岩气开发。

因此,有必要加大非常规地球物理技术研究,主要包括以下两方面。

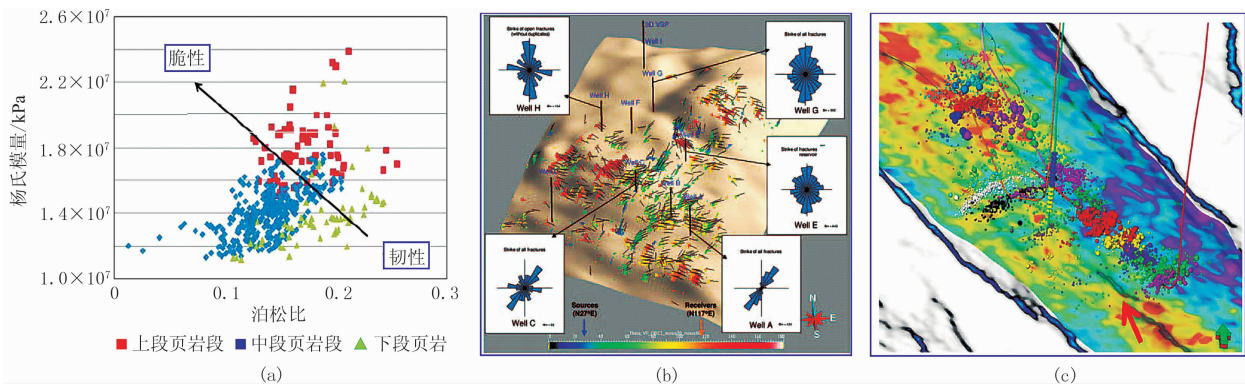


图6 页岩气预测结果

(a)页岩脆性预测(杨氏模量高,则脆性相对高);(b)页岩裂缝预测(通过分方位处理分析,预测裂缝的方向和裂缝尺度);(c)压裂微地震监测(通过对压裂过程的井下观测,指示人造裂缝的空间展布情况)

一是页岩气地球物理识别新方法研究。开展页岩气储层矿物组分、孔隙结构、裂缝分布对地震弹性模量的影响及分析方法、VTI各向异性参数计算方法、地震岩石物理建模、页岩储层各向异性地震波场数值模拟方法等研究,形成包括VTI、HTI、ORT(正交各向同性)、MONO(单斜各向异性)四种各向异性类型和速度、偏振、全波场三种地震属性描述方法。

二是煤层气地球物理识别新方法研究。包括煤层气储层地震岩石物理建模研究、煤层气地震三参数弹性反演方法、煤层气地震裂缝响应特征数值模拟、煤层气探区地震裂缝检测、煤层气探区地震资料综合分析等研究。

通过以上研究,形成页岩储层纵波各向异性成像处理方法、页岩储层脆性估算方法、煤层气地震三参数弹性反演方法、煤层气的裂缝检测与含气丰度预测等技术,为我国非常规油气藏勘探提供新的手段。

3.5 微地震监测技术

微地震监测是观测水力压裂、油气采出、或常规注水、注气以及热驱等石油工程作业时引起地下应

力场变化,导致岩层断裂或错断所产生的地震波,进行压裂裂缝成像、或对储层流体运动进行监测的技术。微地震监测在判断压裂效果、实时调整压裂方案等方面具有独特优势,是提高低渗透、页岩气、煤层气等致密油气藏开发成效的有效手段。

我国致密低渗油气藏包括致密砂岩油气藏、碳酸盐岩油气藏、火山岩油气藏、页岩气、煤层气等,具有巨大的资源潜力和勘探远景。但是,这些低渗透资源储量的有效动用难度大,目前开发获取高产的关键技术是水平钻井、压裂储层改造,而压裂效果只能通过后期开发情况进行评价,增加了压裂控制和开发调整的难度。微地震监测技术可以实时对压裂效果进行评价,及时提供压裂方案的调整,使压裂效果达到最佳,使难动用储量成为可动用储量。

国内微地震监测技术研究起步较晚,现今的微地震压裂监测工作主要依赖国外服务公司进行,不仅增大了压裂开采成本,也制约了国内致密油气藏的开发。因此,应加大微地震监测技术研究,以提升中国石油工程技术服务水平,达到实时监测压裂效果,调整压裂方案,提高单井产量,为致密砂岩气藏、页岩气储量的有效动用提供技术支撑。主要开展以

下五个方面的技术研究。

一是微地震资料采集技术研究,包括微地震波正演模拟、微地震压裂监测采集设备及观测方式的优选、微地震压裂资料波场研究。

二是微地震资料处理技术研究,包括微地震弱信号提取、微地震事件三分量分析方法、微地震事件的自动识别、微地震震源的实时定位、岩石破裂波场数值模拟、地面微地震直达波的静校正、地面微地震去噪、地面微地震速度模型反演、地面微地震震源定位、地面微地震震级计算等技术研究。

三是微地震资料解释技术研究,包括微地震事件裂缝参数计算方法、裂缝三维可视化成图技术、微地震震源破裂、压裂参数的综合解释等技术。

四是微地震压裂监测与油藏模型综合分析技术研究,包括微震裂缝的标定方法、压裂裂缝参数反演、单井/井组原始油藏模型建模、微震事件的三维可视化显示、裂缝体积计算、基于微震信息的油藏模型渗透率计算方法等技术研究。

五是微地震资料处理解释及油藏综合分析,包括微地震采集、处理、解释及油藏模型综合分析等。

通过以上研究,能够填补国内技术空白,满足低渗油气藏、致密砂岩气、页岩气藏、煤层气开发多级压裂井裂缝监测的需要,实时确定压裂裂缝空间位置和展布(图 7),及时指导油田压裂,为提高单井产量及油田高效开发奠定技术支撑。

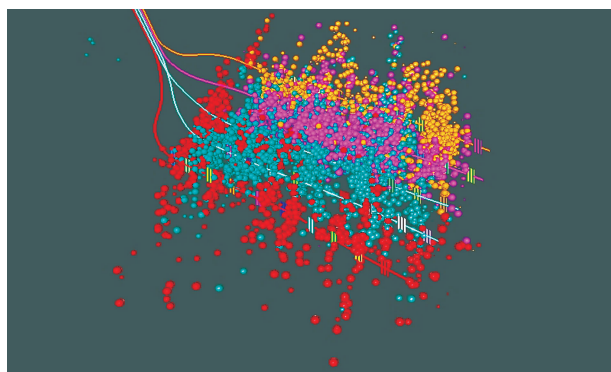


图 7 分支井多级压裂微地震监测的裂缝空间展布

3.6 非均质储层低频地震响应特征

在实际生产中,利用测井资料标定地震层位时,因子波提取得不准确会造成反演结果存在巨大误差。声波测井数据与地震数据是属于不同频段的波。因此,有必要在跨频段岩石物理分析基础上,开展基于跨频段岩石物理分析的井—震匹配研究,进

而推进地震解释、层位标定、井约束地震反演、属性分析等技术的发展与进步。主要开展以下三个方面的研究。

一是跨频段岩石物理实验及分析。开展基于共振声谱法和应力应变法的跨频段岩石物理实验研究,测试不同环境因素下岩石的纵横波速度、弹性模量、Q 值等参数的变化,改进储层岩石物理理论模型,提高实验结果与理论模型的拟合精度。

二是跨频段数值岩石物理—岩石物理数据精确标定,建立频散校正经验模型。对储层中的地震波场、岩石物理参数随环境因素的变化进行数值模拟,分析不同频段地震波对岩石物理参数的响应差异和尺度效应,建立频散校正经验模型,为超声、测井、地震资料的综合应用提供理论依据。

三是基于跨频段岩石物理的分析及应用研究。分析岩石物理实验及数值模拟结果,分析实际测井资料与地震资料的尺度效应、速度频散对岩石物理参数的响应特性等,确定井、震资料的定量关系,建立充分考虑井震关系的子波提取方法。

3.7 深层地球物理技术

中国石油深层油气勘探领域包括西部盐下砂岩气藏、深层碳酸盐岩缝洞型油气藏、东部松辽盆地及其东南隆起带、渤海湾深潜山及深盆等。

近几年,针对深层开展了宽线大组合采集、叠前深度偏移处理等技术攻关,深层成像得到改善。但深层勘探普遍面临信噪比低、成像精度低、构造落实程度低等问题。

为此,针对西部深层砂岩构造油气藏,要发展宽频、长排列、超长排列地震采集技术,深化复杂区速度建场及 TTI 各向异性、高斯束偏移、双程波动方程逆时偏移配套处理技术攻关,提高复杂构造的信噪比和偏移成像质量。针对深层碳酸盐岩,以提高地震资料空间分辨率和油藏表征精度为目标,开展全数字、3D3C、“两宽一高”等地震采集技术攻关,提高非均质储层定量化雕刻精度,为产能建设提供技术支撑。针对东部深层油气勘探,开展全方位三维地震数据采集、处理,有效提高地震资料品质,开展低频地震采集,提高深层地震反射波能量,采用逆时偏移处理技术提高中深层复杂构造及复杂断裂系统成像精度,提高深层油气勘探成功率。

3.8 深海地球物理技术

中国石油集团在南海深水海域油气勘探的水

深范围是 900~1300m,地震作为先行技术,已实施了大量的二维和三维地震,并在国外 50 多个区块提供深水地球物理服务。该领域面临深海环境和地质方面的难题,国外已广泛应用多缆、高密度、宽频海洋采集技术及全波形速度建模、多次波压制等处理技术,而我们的技术服务能力在某些方面相对于国外公司还比较薄弱。

为此,应加强多层、多缆高端海洋地震采集船舶的建造,加强海洋宽频地震采集技术研究,提高海洋勘探能力;开展消除海上虚反射、速度建模、深度偏移等技术的研究,开展海洋可控源电磁技术研究,提高构造落实程度和烃类检测的可靠性;加快叠前地

震资料的解释,全面学习、探索海洋地震勘探理论体系,形成国际先进、具有自主知识产权的地震勘探技术系列。

3.9 电磁—地震联合勘探技术

由于电磁对高阻地下目标探测效果好于地震,对地层岩性变化反映灵敏、对油气饱和度变化反应灵敏而广受推崇,重磁电技术一直是地球物理界持续发展并发挥了重要作用的关键技术。

由于电磁技术分辨率较低,在精细勘探中只能作为辅助手段。近几年,电磁—地震技术联合应用,在构造带和特殊目标联合解释、油气圈闭联合检测评价等方面发挥了重要作用,如图 8 所示。

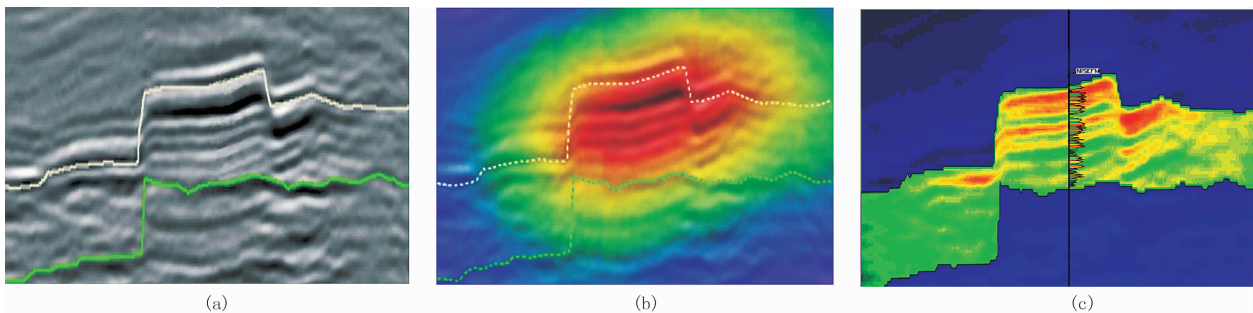


图 8 电磁—地震联合解释成果

- (a)地震解释的地垒,无法判断是否含油;(b)电磁解释的高电阻异常,具有高含油概率;
(c)电磁—地震联合反演,预测地垒砂岩储层含气,饱和度高

目前,地震技术在复杂地区依然面临较大挑战,如上覆地层岩性变化造成速度异常,致使深层成像不准;深层反射信噪比低,成像不清,岩性识别难,无法确定有利目标;地震发现的构造和地层岩性圈闭异常,如何判断是否具工业油气价值;油田开发后期,剩余油气、油水分布如何有效圈定?以上实例说明,利用电磁技术,有望辅助解决这些问题。

为此,应开展电磁—地震联合速度建模技术、地震—电磁联合反演的深层异常目标识别技术、电阻率、极化率、介电参数等油气敏感参数反演技术、井地电磁剩余油检测技术等研究,进一步提高油气识别成功率。

4 展望

4.1 未来技术发展方向

现今中国石油的勘探区域中,复杂地表分别占石油和天然气勘探地表类型的 60%和 90%,深层目标在油气勘探中占 35%以上,低渗透、低丰度油藏

占总探明储量的 65%以上,促使未来地震技术向更轻便的采集仪器、更高的空间采样密度、全方位、全弹性波处理、综合一体化解释方面发展。具体如下。

(1)轻便地震仪器是地震技术发展的驱动力。现代网络技术支撑的百万道无线遥测系统,使高密度、超高密度、单点采集变为现实。

(2)高密度地震及快速处理技术。快速处理方法的应用和不断改进是高密度地震发挥商业价值的关键。

(3)深层盐下地震成像技术。盐体是扭曲声波的透镜,造成其下产生盲区,速度建模和算法改进,将提高盲区成像精度。

(4)3D CSEM(可控源电磁法)建模及反演技术。快速 3D CSEM 建模和反演将帮助减少对水合物、盐、火山岩等可产生与油藏相似响应的误判,提高油藏识别精度。

(5)浅水及陆地 CSEM 技术。浅水及陆地环境比深水环境噪声大,通过高噪声环境数据采集和分析研究,可极大地延伸 CSEM 的应用范围,提高陆

地油气识别的可靠性。

(6)新的井中地球物理技术。利用新型多信息传感器,增加地层信息,特别是非常规储层的数据测量,如煤层气吸收、非常规产量数据等,既提高储层识别精度,又提高油气藏生产管理能力。

(7)全弹性波动理论研究。波动理论基础研究一直在工业界和学术界持续开展,能够进行更精确的地震数据定量成像和建模,带来勘探技术巨大进步。

(8)非常规油气储层地球物理预测技术研究。非常规油气是重要的勘探新领域,急需研发经济有效的地球物理预测技术。

(9)大型地球物理模型实验技术。大型的地球物理模型实验技术能更好地研究复杂储层的地球物理响应特征,是基础理论研究的重要手段。

4.2 发展建议

面对油气勘探开发难度加大、新兴业务发展迅速,对物探技术要求越来越高的形势,中国石油集团管理层指出物探“要力争成为国际物探技术的领跑者,走国际化科技创新发展的道路”。因此,我们要加速物探技术发展,依托集团公司整体优势,建议重点做好以下几个方面的技术研究。

(1)发展新一代开放式一体化全数字地震仪。集有线、无线、节点等多项能力,以降低高密度、单点采集成本,促进物探新技术应用。

(2)发展物探数据处理解释一体化系统。使处理解释过程共享、成果共享,达到解释指导处理、处理指导解释的有机互动。

(3)开展物探新技术新方法等储备技术研究。持续开展油藏地球物理特色技术、速度建模及偏移新技术、多波特色处理解释技术、非常规资源地球物理识别技术、微地震监测技术研究,开展 CSEM、原子介电常数等油气直接检测技术研究,在钻前预测油气,降低钻探风险,开展针对深层和深海的地球物理关键技术研究。

(4)开展物探配套技术研究。发展以高端装备、集成化采集处理技术为主的海洋地球物理勘探配套

技术,以复杂山地、高密度、碳酸盐岩、综合物化探为主的油气重点领域配套技术,以可控震源高效采集、高效钻运装备等为主的提高地震采集作业效率配套技术等。

参考文献

- [1] 王炳章,蔡俩. 石油物探在我国油气发现与发展中的作用,纪念《石油物探》创刊50年. 石油物探, 2011, 50(6):533~544
Wang Bingzhang, Cai Liang. The role of geophysics prospecting in promoting the development of Chinese petroleum industry, in memory of the 50th anniversary of publication of Geophysical Prospecting for Petroleum. *GPP*, 2011, 50(6):533~544
- [2] 刘振武,撒利明等. 中国石油物探技术现状及发展. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 1~10
Liu Zhengwu, Sa Limim et al. Current situation and trend of geophysical technology in CNPC. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(1): 1~10
- [3] 刘振武,撒利明,董世泰等. 主要地球物理服务公司科技创新能力对标分析. 石油地球物理勘探, 2011, 46(1):155~162
Liu Zhengwu, Sa Limin, Dong Shitai et al. The innovation capabilities comparison analysis of main geophysical company in the world. *OGP*, 2011, 46(1): 155~162
- [4] 刘振武,撒利明,董世泰等. 中国石油天然气集团公司物探科技创新能力分析. 石油地球物理勘探, 2010, 45(3):462~471
Liu Zhengwu, Sa Limin, Dong Shitai et al. The innovation capabilities analysis of geophysical science and technologies in CNPC. *OGP*, 2010, 45(3):462~471
- [5] 王喜双,曾忠等. 中国石油集团地球物理技术的应用现状及前景. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5):768~777
Wang Xishuang, Zeng Zhong et al. The geophysical technologies application situation and foreground in CNPC. *OGP*, 2010, 45(5):768~777
- [6] Li X Y and Zhang Y. Seismic reservoir characterization: How can multicomponent data help? *Journal of Geophysics and Engineering*. 2011, 8(2): 123~141

(本文编辑:冯小球)