



微地震监测

明察地下微小震动 精绘缝网立体迷宫

聆听裂缝“生长”的声音

胜利油田微地震监测技术应用320余口油井,累计增油超100万吨

□李国栋 武天祥

“贵院微地震压裂监测技术展现出极高的专业性和精准性,有效监测裂缝扩展规律,精准指导储层改造,为东北油气勘探开发降本增效作出了贡献。”今年4月,一封来自东北油气的感谢信令胜利油田物探院微地震团队科研人员倍感自豪。随信而来的,是一份为期两年、累计80口井的微地震监测合同。

经过10余年潜心攻关,胜利油田物探院微地震压裂监测技术已在山东、新疆、吉林、青海等地现场应用320余口油井,累计增油超100万吨,在压裂效果评价、压裂工艺优化、井网部署调整等方面发挥了重要作用,助力低渗透致密储层、页岩油高效勘探开发。

养鸡棚里试验起步

低渗透油气藏和页岩油气藏的储层缝隙小、流动阻力大,油气被堵在孔缝里难以开采。压裂是一种提高采收率的有效手段,可以使油层产生多条长、宽、高不等的人工裂缝,相当于给油气修建了一条“高速公路”。“运移通道打开了,油气产量自然就增加了。”胜利油田地震资料处理高级专家尚新民说。

科学准确评价储层压裂改造情况,事关压裂油气井长期稳产。早在2011年,胜利油田物探院就依托国家“863”课题开展前瞻性研究,在调研了电磁法、微地震、测斜仪、示踪剂等多种技术路线后,毅然选择了难度最大的微地震技术。

当时微地震技术还是冷门,胜利油田没有这方面的基础,也没有专业技术人员,研究攻关的难度远超想象。科研人员通过深入查阅大量的国内外文献,积累了丰富的理论知识,于2013年夏天在胜利油田开展首次地面微地震压裂监测试验。

“当时做非常规Y227‘井工厂’,现场资料分析,采用有缆检波器、节点式站和天然地震仪等3种仪器同步监测。为确保仪器24小时正常工作,我们就租了附近一个废弃的养鸡棚作为工作间,蹲了30多天,拿到了两口井23段压裂监测数据。”回忆起那个难忘的夏天,物探院微地震监测专家刁瑞关心的仍然是数据是否取全取准。

为解决压裂信号能量弱、噪声干扰严重等问题,科研人员从烈日烘烤的沙漠戈壁到白雪皑皑的盐碱滩,累计步行1000余公里,结合岩芯压裂试验结果,摸清了不同工区典型噪声的特征、信号传播规律,为后续噪声压制和弱信号捕捉夯实了基础。

“悬丝诊脉”破解开发难题

压裂施工造成地层破裂,产生微弱的人工地震,地面检波器接收后,可以据此计算出人工裂缝的空间方位、延伸长度、生长过程等信息。

“技术原理并不复杂。”尚新民介绍,“但是微地震的信号能量非常弱,先要在海量的环境噪声中找到它们,再进行空间精确定位,每一步

都困难重重。”

生产需求就是科研创新的方向,实验室里的科研成果最终要走向一线井场,变为现实的生产力。胜利油田物探院科研人员率先提出了“微地震-地质-物探-工程”一体化技术思路,发明了微地震联合校正、多域噪声压制、有效信号数字化判识、精确定位、裂缝层析成像、矩张量反演和裂缝动态展布等弱信号精细处理解释技术系列,先后推出了五代野外采集专用设备,研发了功能完善的“地面+浅井+井中”微地震立体监测硬件装备及软件系统UPSeis。

Y560-X9井应用微地震监测技术后,通过持续优化组合缝网压裂新工艺,日产油量比采用老工艺的邻井多2.1倍。同样依托微地震监测数据,GX26井采用扩容分支缝压裂新工艺,日产液量提高150%,解决了“有油采不出”的难题。

“现在,我们的原始资料信噪比提升了3倍以上,采集成本降低了60%,具备了压裂监测全链条服务能力,技术水平走在行业前列。”刁瑞说。

“火眼金睛”看清地下迷宫

“裂缝朝哪个方向延伸、有多长,压裂井是否是周围的水井连通、会不会发生水淹水窜现象,哪种改造工艺的效果最好,怎样实现油藏改造效益最大化……”胜利油田物探院压扭盆地地震资料处理技术首席专家芮荫军说,“这些是在压裂施工现场谈论最多的话题。”

有了微地震技术,实现了压裂监测由“事后评价”向“事中指导”的大跨越,使得看清幽暗地层深处的裂缝空间分布成为可能。

2022年5~8月,物探院微地震团队在胜利油田FY1井组完成了当时国内最大规模的水力压裂微地震实时监测,共计8口井256段,实现了微地震实时采集、实时处理、实时展示,其中5口井峰值日产油量超过100吨,受到甲方好评。2023年5~9月,他们又在NY1区首次完成了同区块两套压裂车组同步压裂的微地震实时监测。

一项项纪录,见证着微地震团队从努力“跟跑”到齐头“并跑”再到一些领域“领跑”的华丽转变。科研人员勇敢走出舒适区,与国内外油服公司同场竞技。

2024年初,微地震监测技术成功在东北地区龙凤山气田、金山气田实现应用。依托微地震压裂实时监测结果,现场技术人员及时调整L13井暂堵方案,形成了砂体扇根部位的针对性压裂工艺,节省施工成本近100万元。近日,根据已完工的30余口井微地震监测结果,东北油气又对B201-67井、B201-68井压裂工艺进行实时优化,缝网复杂程度提升了20%以上。

“每一段人工压裂缝网的延展方向、长度、宽度等都能清晰实时展示,压裂改造效果也能量化评价。”尚新民介绍,凭借监测数据,工程人员可以算出不同压裂方案的最优产油量,优选出产量高、成本低的方案,降本增效效果显著。

阅读提示

微地震监测技术作为油气田勘探开发一项重要创新技术,近年来正发挥着越来越重要的作用。它通过监测压裂过程中岩石破裂产生的微小震动,确定岩石破裂位置及时间,分析目的层岩石活动及状态,实现压裂缝网展布特征的刻画,达到实时调整压裂工艺、规避工程风险、增强储层改造效果的目的,对于提高油气勘探开发效率、降低开发成本具有重要意义。



胜利油田物探院微地震团队正在进行现场测试。

武天祥 摄

专家视点

微地震监测技术助力油气田精准开发

□地球物理公司地理地质信息勘察分公司井筒地震专家 宋慧娟

地球物理公司胜利分公司副总政工师,工程物探中心党支部书记、副经理 陈泽东

微地震监测技术就像是神奇的“地下侦探”,能通过监测压裂过程中岩石破裂产生的微小震动,确定岩石破裂位置及时间,分析目的层岩石活动及状态,实现压裂缝网展布特征的刻画,达到实时调整压裂工艺、规避工程风险、增强储层改造效果的目的。该技术是目前最全面的评价压裂效果的手段,在非常规油气水力压裂过程中得到了广泛应用。

微地震监测技术在储层改造效果评估和开发方案优化方面具有较为重要的应用价值,在一些典型区域非常规油气开发中也见到了较好的实际应用效果。在江汉油田焦石坝主体区块,通过微地震监测证实了加密开发的必要性和可行性,并根据工区多口井监测获得了缝网波及高度,支撑了区块水平井立体开发方案的形成。技术人员通过分析复兴区块缝网展布特征与工艺参数、地质条件的关系,确定了水平双向应力差小是本区段干扰严重、波及长度短的主要影响因素,因此在后续压裂设计中适当增加了段间距,从而收到减少重复改造、提高压裂效率的效果。同时,在天然裂缝较为发育的开发区域,利用微地震实时监测,可对套变、压裂沟通断层等特殊情况进行及时提示,通过缩小压裂规模避免不必要的工程损失。

微地震监测主要包括数据采集、震源成像和精细反演等关键步骤,是油气田高效勘探开发的关键技术,已广泛应用于水力压裂裂缝监测、油藏动态监测、注水监测等业务领域。尤其是在页岩气开发过程中,微地震水力压裂裂缝监测已成为储层压裂过程中精确及时、信息丰富的监测手段。随着微地震观测系统和技术方法的进步,以及对微地震震源机制、反演及可视化的深入研究,微地震记录质量越来越高,应用范围将不断扩大,发展前景更加广阔。目前,该技术发展面临的挑战主要集中在震源机制研究、微地震数据反演与解释、永久微地震监测、水平井微地震监测等四个方面。

国内常用的微地震监测方法包括地面微地震监测、井中微地震监测及三分量浅井阵列监测。中石化地球物理公司是集团内技术序列最完善、一体化服务能力最强的公司,具备全部三种监测方式的一体化服务能力。该公司在实践中形成了多项微地震监测关键技术:复杂地质条件下微地震观测系统设计技术,可实现更加经济、科学、高效的数据采集;倾斜层状各向异性速度建模及基于地表高程的分频静校正等技

术,可将定位精度提高30%以上,提供更高精度的微地震处理结果;针对微地震信号能力弱的问题,加入窄带滤波扫描成像界面,增加事件识别的标准及可信度,同时有效提高弱信号识别能力,使微地震监测技术能适应目的层深度不断增大的监测需求。

未来,随着非常规油气开发精细度不断提升,需要针对不同小层、不同岩石力学特征的压裂段确定针对性开发方案,也促使微地震监测不断向高精度处理解释发展。

地面微地震监测弱信号识别是现阶段攻关重点。当前的层深度不断增加,在地表衰减严重、环境噪声大的工区,地面微地震监测只能监测到较大震级的事件,缝网刻画精度受到限制,因此发展经济有效、适应不同环境的观测系统,持续提升弱信号识别能力是增强地面微地震监测应用效果的有效途径,需深入开展技术攻关。

井中微地震监测重点提升水平成像精度和范围。井中微地震监测处理目前能够实现实时处理,但是水平成像精度和范围还有很大的提升空间。偏振角度、初至时间的轻微扰动都会导致井中微地震事件定位的明显差异,通过人机交互和迭代求解技术提高计算、拾取精度是目前主要的技术攻关方向。此外,发展国产化耐高温、大阵列井下三分量检波器,进一步降低监测成本,扩大适用范围,也是下一步井中监测发展重点。

单一监测方式向多方位多角度联合监测发展,增强微地震监测技术应用效果。通过运用井-地联合监测、多井井中监测、浅井-光纤永久监测等多种观测方式,提高微地震监测精度、丰富解释成果。

加快发展微地震光纤监测技术。分布式光纤传感技术应用于压裂监测,国外已逐步推广,国内处于前期探索试验阶段,未来应尽快推动永置式光纤各类攻关试验,推动分布式光纤传感技术在压裂监测中的应用。

持续加强地质工程一体化。微地震监测技术是地质工程一体化的桥梁和纽带。通过以地震地质与微地震的联合解释为基本导向的地质工程一体化技术,对影响页岩油储层产量因素进行综合分析,针对非常规储层的地质特点和经济因素,建立更加合理的工作流程,实现技术和效益的双提高。

开展CCS(二氧化碳捕集与封存技术)与储气库微地震监测工作。对储气库内断层、盖层及井筒进行微地震实时监测,掌握气藏内部变形机制、传导性裂缝和再活动断裂构造形态信息,以及流体流动的分布和压力前缘的移动状况,从而为储气库生产运行管理提供决策依据。

(陈俊 整理)

知识链接

●微地震是什么?

微地震是岩体内因应力场变化导致岩石破裂而产生的强度较弱的地震波,即微弱的地震信号。微地震不同于地震勘探时的人工地震,在生产过程中自然发生,具有能量小、持续时间短等特点。地下岩体破裂产生的声发射现象称为微地震事件。

●微地震监测技术监测什么?

微地震监测技术是一种地球物理检测技术,主要是对生产活动中产生的微小地震事件进行数据采集,并加以观测和分析,对所得数据和结论进行记录,对微小地震事件对生产活动的干扰、效力及岩体保持稳态进行预测。系统监测微地震的三要素是监测活动的首要任务,包括震源的位置、发生的时间、震源深度及强度。

“透视眼”洞察地下奥秘

江苏油田研发微地震监测技术降低页岩油开发成本



江苏油田页岩油微地震团队对永108侧井压裂监测情况进行回顾性评价。

罗红霞 摄

□高和兴 徐博 闻 刘习之

10月30日,江苏油田物探院召开页岩油微地震监测回顾性分析会,就优化监测技术以更好地服务页岩油勘探开发进行了深入研讨。“微地震监测技术能清晰展现每一段压裂缝网的延伸方向、长度、宽度,量化评价压裂改造效果,对页岩油效益开发至关重要。”江苏油田地球物理勘探专家庞全康介绍。

目前,江苏油田物探院已使用自主研发的微地震监测技术为4口井提供技术支持,实现了微地震采集、数据处理、综合解释自主化,为页岩油开发降本提质提供了有力支撑。

从无到有 室内试验取得成功

2021年,江苏油田拉开了页岩油勘探开发的序幕,接连部署实施了13口页岩油水平井,探索不同凹陷、不同层段、不同类型、不同井型的页岩油产能。在这个过程中,微地震监测技术功不可没。“它就像一双能看穿地下人工缝网的‘透视眼’,将压裂施工过程中裂缝扩展情况尽收眼底,是指导压裂施工和评价压裂效果的重要手段。”庞全康说。

此前,江苏油田花庄地区的页岩油井都是借助外部力量进行微地震监测,但无法及时对压裂效果进行长期连续的分析和评价。为此,2023年初,江苏油田物探院搭建了由专家牵头,90后主力科研人员为核心的技术团队,引入微地震处理解释软件,朝着研发自主可控页岩油微地震压裂监测技术方向展开攻关。

2023年7~8月,攻关团队对照之前的实践案例,边学习边探索,相继完成了花页1井、花2侧井的微地震监测处理解释试验工作,得到的结论与之前的数据较为接近,实现了微地震监测技术从无到有的突破。

从有到优 近出现场应用关键一步

今年3月,在高邮凹陷的永106井,江苏油田物探院微地震监测团队迈出了从室内试验到现场应用的关键一步。在监测现场,压裂液通过高压快速注入地层使地下岩石破裂产生裂缝,分布在水平井周围的近2000台微地震监测检

波器不间断地接收着来自地下的“战报”。

“室内处理时,我们更关注结果,但是现场实时处理需要在一两分钟内把数据传输到生产指挥中心,这就对监测技术提出了更高的要求。”技术人员周光锋说。永106井处于乡镇地区,车辆、工业等噪声干扰严重,且苏北盆地断裂系统发育、地质条件复杂,传统的监测和分析方法难以准确定位有效的微地震事件点,这让很多人对自主监测技术的可靠性产生了怀疑。

为此,江苏油田相关专家带领技术团队对数据的定位方法进行深入研究,优先处理信号强的微地震信号,同时缩短切割时间,减少单次的处理工作量。经过反复调试和优化,团队成功实现了对微弱信号的准确定位,为压裂方案的优化提供了科学依据。

他们在永106井成功实施微地震监测,不仅验证了江苏油田物探院自有技术的可靠性,更为后续应用积累了宝贵经验。

单井监测成本减半 助力页岩油效益开发

为持续深化微地震监测技术、实现页岩油降本增效,微地震监测团队对前期出现的问题进行全面复盘,研发了时距约束技术,进一步提高了裂缝延展准确度。

永108侧井是江苏油田部署在阜四段的首口页岩油水平井,也成为技术优化后的首块“试验田”。该井的储层特征与之前的阜二段有较大差异,技术团队通过多次优化采集参数、验证模拟数据,确定了最优的监测施工方案。经过20多天的努力,永108侧井的监测任务顺利完成,预测的微地震事件点展布特征和施工参数、地下裂缝均吻合,新技术的可靠性得到了进一步验证。

“据统计,使用我们自主研发的微地震监测技术,页岩油压裂单井监测成本降低约50%。未来,随着苏北盆地页岩油产能建设持续扩大,成本有望进一步降低。”江苏油田物探院物探方法软件部主任薛永安说,“今后,技术团队将持续推进‘物探-地质-工程’一体化攻关研究,助力页岩油高质量规模建产和效益开发,同时积极探索微地震监测技术在绿色能源领域多元化应用潜力,为油气行业可持续发展开辟新路径。”

微地震压裂监测现场。

武天祥 摄