

页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨

罗蓉¹ 李青²

1. 川庆钻探工程有限公司工程技术处 2. 西南石油大学石油工程学院

罗蓉等. 页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨. 天然气工业, 2011, 31(4): 34-39.

摘要 我国页岩气资源潜力巨大, 勘探开发一旦突破并形成产能, 必将对缓解中国油气资源紧张的压力产生重大深远的影响。页岩气藏与常规天然气藏在储集、运聚、保存等地质条件方面有较大差别, 其含气储层速度变化小, 具有典型的低孔、低渗物性特征和地球物理参数弱敏感性, 对地球物理预测评价技术和方法提出了新的挑战。根据国外页岩气勘探开发经验, 水平井钻井和储层改造是页岩气勘探开发提高产量的关键技术, 而地球物理方法则是优化页岩气钻井及储层压裂改造部署的必要技术支撑, 能贯穿始终服务和指导勘探开发工程。因此, 通过对页岩气层岩石物理特性和页岩气储集特征的研究, 指出应利用现有地球物理成熟技术和借鉴国外页岩气勘探开发的成功经验, 来探索适合我国页岩气测井识别评价技术和页岩气地震预测、监测技术。

关键词 页岩气 勘探 开发 地球物理勘探 测井 识别 预测 监测 评价

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2011.04.008

2020年我国天然气供需差距预计在 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上^[1], 页岩气作为一种清洁能源, 具有开采寿命长的优点, 一旦突破形成产能, 必将对缓解中国油气资源紧张的压力产生重大深远的影响。据专家估算, 我国页岩气可采资源量约为 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1], 与美国大致相当^[2], 主要分布在我国南方、华北及塔里木海相盆地, 以及北方大片陆相盆地。资源评价结果表明, 四川盆地志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组海相页岩气潜力巨大, 页岩气资源与整个四川盆地常规资源量相当。从目前勘探准备和可能提交储量情况分析, 四川盆地及其周缘川渝黔鄂将是近期页岩气开发的主阵地, “十二五”期间力争在盆地南部页岩气资源战略调查先导试验区取得突破。

我国页岩气资源勘探开发尚处于资源评估和勘探探索启动阶段。当务之急, 就是要通过借鉴国外的页岩气勘探开发技术, 进行多学科联合攻关, 逐步形成页岩气勘探开发配套技术, 如地质选区技术、地震勘探技术、储层评价技术、钻井技术、储层改造技术、资源评价技术等。2010年首次分别在四川盆地南部完钻了页岩气井W_x井和N_x井, 继而又开始了水平分支井

的实施。W_x井龙马溪组、九老洞组和N_x井筇竹寺组页岩气藏的地质特征指标与美国Barnett页岩气藏的深度、总有机碳含量、有效孔隙度、含气孔隙度、吸附气含量、气藏压力及气蕴藏量等指标具有较好可比性, 经压裂储层改造后均获得大于 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流, 向页岩气勘探开发迈出了成功的一步, 特别是在页岩气地质选区、钻井技术、储层改造技术等方面有了初步的认识, 同时对利用测井和地震勘探等地球物理方法进行页岩气高产富集区识别预测和评价, 以及为钻井轨迹设计和储层改造目标提供技术支撑方面提出了迫切要求。

1 页岩气地质特征及勘探开发难点

1.1 成藏条件和聚集方式与常规气藏不同

页岩气藏与常规天然气成藏机理和聚集方式有很大差别^[3-5](表1), 页岩气既是烃源岩又是储层, 呈区域性分布, 缺少明显的盖层, 无圈闭, 无明显气水界面(不含水或极少含水)。据美国页岩气勘探开发表明, 地质预测页岩气藏关键参数的最小值^[6]: 有机碳含量大于2%、热成熟度(R_o)大于0.4%、孔隙度大于1%、渗

表 1 页岩气藏与常规气藏聚集基本特点对比表

特 点	页岩气藏	常规气藏
界定	主要以吸附和游离状态聚集于泥岩或页岩中的天然气	浮力作用影响下,聚集于储层顶部的天然气
天然气来源	生物气或热成熟气	多样化
储集介质	页岩或泥岩及其间的砂质岩夹层	孔隙性砂岩、裂缝性碳酸盐岩等
天然气赋存	20%~85% 为吸附,其余为游离和水溶	各种圈闭的顶部高点,不考虑吸附影响因素
成藏主要动力	分子间作用力、生气膨胀力、毛细管力等	浮力、毛细管力、水动力等
成藏机理特点	吸附平衡、游离平衡	浮力与毛细管力平衡
成藏条件	生气页岩或泥岩、裂缝等工业规模聚气条件	输导体系、圈闭等
运聚特点	初次运移为主成藏	二次运移成藏
成藏条件和特点	自生自储	运移路径上的圈闭
主控地质因素	成分、成熟度、裂缝等	气源、输导、圈闭等
成藏时间	天然气开始生成之后	圈闭形成和天然气开始运移之后
分布特点	盆地古沉降—沉积中心及斜坡	构造较高部位的多种圈闭
成藏及勘探有利区	4 000 m 以浅的页岩裂缝带	正向构造(圈闭)的高部位

透率大于 1 mD、厚度大于 9 m。与常规气藏相比,具有弱敏感地球物理参数特征,要求利用地球物理技术方法识别雕刻出页岩气藏特征,大大增加了难度和提高了精度要求。

1.2 储集层条件差

页岩气主体上是以吸附或游离状态存在于泥岩、高碳泥岩、页岩及粉砂质岩类夹层中的天然气。页岩气储集层是由岩化的黏土、有机物质和矿物质混合而成。页岩产层厚度一般为 15~100 m,储集空间由孔隙和微裂缝组成,页岩以小粒径物质为主,一般以黏土(粒径小于 5 μm)和泥质(粒径 5~63 μm)为其最主要组分,砂(大于 63 μm)所占的组分相对较少。具典型的低孔、低渗物性特征,孔隙度一般为 4%~6%,渗透率小于 0.001 mD,最低可达 10⁻⁹ mD,处于断裂带或裂缝发育带的页岩储层渗透率可以增加,孔隙度最高可达 11%,渗透率可达 1 mD^[7]。页岩气的生产是通过地层压力降低不断解吸吸附气为游离气获得的,因此,利用常规天然气勘探开发技术难以有效获得页岩气,成为页岩气勘探开发的技术瓶颈,也给利用地球物理方法识别评价和预测提出了新的挑战。

2 地球物理技术在页岩气勘探开发中的作用

根据国外勘探开发成功经验,页岩气井初始无阻流量没有工业价值,其经济产量依赖于天然裂缝发育程度、页岩脆性以及钻、完井技术^[7],页岩的孔隙度、基

岩渗透率都非常低,必然要考虑如何提高系统的渗透率,水平井及多级压裂改造等工艺技术便成为页岩气勘探开发的关键技术。如何指导页岩气钻井部署和储层改造优化方面,地球物理技术是必要的手段,作为技术支撑具有举足轻重的作用,能贯穿始终服务和指导勘探开发工程。

2.1 优化钻井及储层压裂改造部署

1)通过地球物理技术选择最佳钻井目标和钻进延伸方向。在页岩气宏观区带选择和目标确定时,需要全面分析预测有利的页岩气生储地质条件分布范围。钻井目标应选择在有机质与硅质富集、孔隙度及裂缝发育程度高的页岩区及层位,钻井轨迹应选择大致沿页岩最大水平应力即垂直于主要裂缝网络系统的方位钻井,能够生成众多横向诱导裂缝,使天然或诱导裂缝网络彼此联通,提高页岩气钻探成功率。

2)结合地球物理技术分析如何在储层改造中获得最有效的多层裂缝。根据岩石力学脆性选择压裂模式,通过加砂水力压裂改造,尽可能多的沟通天然裂缝,形成一定导流能力的网状裂缝,产生较大的裂缝与地层接触面积,使气藏的压力降低可能传递到更大的区域,使更多的吸附气解吸出来,从而提高页岩气产量。

3)利用地球物理方法在设计中指导钻井避开大断层、复杂地层和水层,防止压裂裂缝高度沟通可能的岩溶。

2.2 压裂裂缝效果监测

利用地球物理方法确定储层压裂是否成功和下一

步开发目标。在压裂后必须诊断压裂裂缝数据和落实压裂效果,压裂是否成功,并实现页岩气藏多级改造部署的优化。还可利用这些诊断信息,改善油气藏管理,减少压裂未波及产层和不必要的钻进,用于确定有效的布井方案,实现加密钻井开发等。

3 页岩气测井识别评价技术

3.1 测井识别评价目标

就是要形成对页岩气层的生烃能力、储集能力和开发生产能力的测井评价配套技术系列,主要包括以下方面:

- 1)分析建立页岩含气储层岩—电评价关系参数,建立岩石物性参数测井计算模型。
- 2)研究选择有效的页岩气测井配套系列,建立含气页岩敏感的地球物理参数测井响应特征和识别评价方法。
- 3)建立页岩中总有机碳(*TOC*)、热成熟度(*R_o*)计算及评价方法。
- 4)建立含气页岩孔隙度、孔隙压力及渗透率等储层特征参数计算及储层有效性评价方法。

- 5)建立页岩气储层游离气、吸附气、含气饱和度及天然气总量计算及评价方法。
- 6)进行页岩泥质、含砂量、黏土矿物组成及脆性矿物(石英、方解石、长石等)含量计算。
- 7)确定页岩岩石力学参数,形成定量识别含气页岩裂缝和地层应力评价技术。

3.2 测井识别评价技术讨论

结合国外经验及在 *W_x* 井、*N_x* 井等页岩气储层测井识别评价实践结果,目前已取得页岩气测井技术系列初步认识并有待进一步发展完善。图 1 中 *W_x* 井龙马溪组共发育 1 套页岩储层,裂缝不发育,主要以基质孔隙为主,深度为 1 503.6~1 543.3 m。

3.2.1 含气页岩储层的测井识别

页岩气与常规气一样,是不导电介质,具有密度值很小、含氢指数低、传播速度慢等物理特性。与普通页岩相比,页岩气中有机质含量较高,放射性元素铀含量比较高,干酪根的密度较低,通常介于 0.95~1.05 g/cm³ 之间。含气页岩测井响应为“四高两低”特征(图 1),即高伽马、高电阻率、高声波时差、高中子孔隙度,低密度、低光电效应。

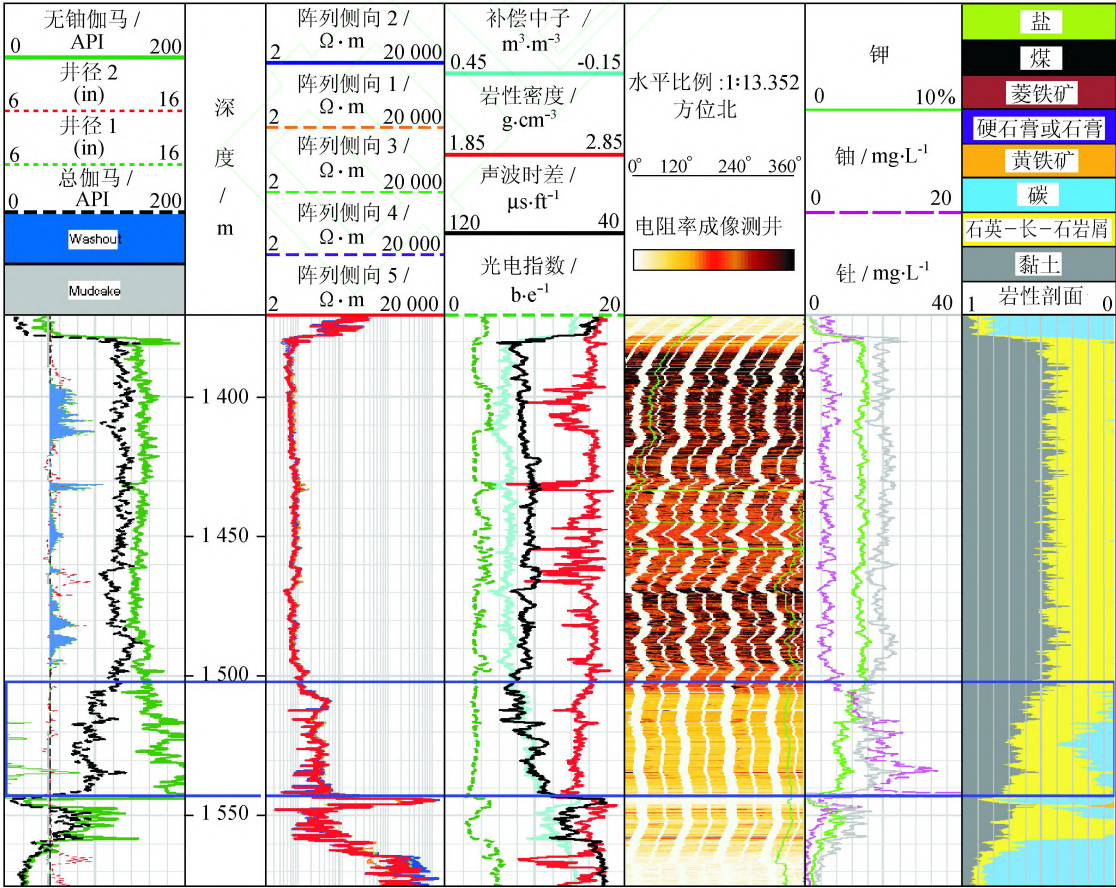


图 1 *W_x* 井龙马溪组测井解释成果图
(1 ft=0.304 8 m,1 in=25.4 mm)

3.2.2 总有机碳(TOC)含量、热成熟度(R_o)指标计算

干酪根的形成多是在一个放射性元素铀含量比较高的还原环境,因而它使自然伽马曲线出现高值。利用自然伽马测井,通过 ECS 测井测得自然伽马能谱分析钾、铀、钍主要元素的丰度,可以定量确定总有机碳的含量。中子—密度法可以指示镜质体反射率(R_o)。

3.2.3 页岩孔隙、裂缝参数评价

根据补偿声波和长源距声波、补偿中子、体积密度密度评价孔隙度。可根据 QFM 模型由 ECS 测得的元素含量换算有关骨架参数的方法(Michael,2002)来计算含气页岩的孔隙度。微电阻率扫描成像测井和核磁共振测井对天然缝、诱导缝以及断层等,都有着良好的分辨能力。压裂后裂缝识别评价可采用井温测井、同位素测井或交叉偶极横波测井来识别评价裂缝高度和长度。

3.2.4 页岩储集层含气饱和度估算

利用双侧向、感应测井、CMR 核磁共振测井等来估算。另外还可根据等温吸附曲线和测井得到地层温度、压力计算地层的吸附气含量,在精确得到黏土矿物含量及其类型和地层孔隙度的基础上,计算游离气饱和度。

3.2.5 页岩渗透性评价

利用自然电位、自然伽马能谱、微电极、CMR 核磁共振测井等来评价。

3.2.6 页岩岩矿组成测定

ECS 元素俘获能谱测井是一种很好的方法,其 ECS 探头应用中子感生的俘获自然伽马能谱测定矿物硅、钙、硫、铁、钛、钒、氯、钡和氢的含量,可以获得准确的地层成分评价结果,包括黏土、碳酸盐、硬石膏、石英、长石和云母等^[8]。

3.2.7 页岩岩石力学参数计算

根据声波扫描测井、中子密度、成像测井来综合计算岩石弹性参数(泊松比、杨氏模量),确定地层应力和最大主应力方位。

3.3 发展水平井随钻测井系统(MWD)

随钻测井^[9]可在水平井整个井筒长度范围内进行自然伽马、电阻率、成像测井和井筒地层倾角分析,能够实时监控关键钻井参数、进行控制和定位,可以将井数据和地震数据进行对比,避开已知有井漏问题和断层的区域。及时提供构造信息、地层信息、力学特性信息,将天然裂缝和钻井诱发裂缝进行比较,用于优化完

井作业、帮助作业者确定射孔和气井增产的最佳目标。

4 页岩气地震预测及地震监测技术

4.1 地震描述及气藏评价目标

自 2009 年至今,川渝鄂已经开展了蜀南、富顺—永川、长宁、昭通等 4 个区块页岩气二维地震项目,威远、长宁 2 个页岩气三维地震项目,从采集到处理解释全面攻关。旨在通过获取高信噪比地震资料,结合页岩气地质地震条件形成南方海相页岩气藏地震勘探技术。该环节的技术进步将会带来对一大批页岩气勘探目标的重新认识,通过对地下目标客观处理和成像实现可优化井位部署,以提高页岩气勘探成功率,降低页岩气勘探风险,加快页岩气资源向储量和产能的转化。页岩气地震描述及气藏评价目标主要包括以下几方面:

1)地层特征包括目标泥页岩层发育特征、埋深及横向变化及可能存在的水层、岩溶和隔挡层。

2)构造特征包括目标泥页岩层区块地层构造位置、构造演化特征、构造发育特征。

3)区域沉积特征包括目标泥页岩层区域地层沉积环境及沉积相划分。

4)页岩气层段分布特征包括页岩气层段纵、横向分布变化及埋藏深度。

5)页岩气层段储层特征包括页岩气层段孔隙、裂缝发育及展布特征。

6)石力学特征包括目标页岩气层段弹性参数泊松比、杨氏模量等及地层应力特征。

4.2 页岩气三维地震勘探技术讨论

目前国内的页岩气地震识别、综合预测及储层改造监测都尚处于摸索阶段。其发展方向为:①页岩气地震勘探技术,即二维地震勘探主要是为页岩气勘探选区工作提供方向,三维地震勘探才是页岩气勘探的有效途径,它能为页岩气水平井部署和提高单井产量提供良好的技术支撑;②页岩气井中地震技术,即借鉴国外成功经验,该项技术能有效监测压裂效果,为压裂工艺提供部署优化技术支撑,这是页岩气勘探开发的必要手段。

4.2.1 发展页岩气高精度三维地震采集技术系列

在页岩气地震勘探中,鉴于与碎屑岩和碳酸盐岩储层不同,属于低孔、低渗气藏,因此,要做到精益求精,在实现地震的“采集、处理、解释和建模一体化”条件下,做好精细表层结构调查,优化激发接收参数,选择合理有效的观测系统,包括面元大小、道距、覆盖次

数、最大炮检距等。在保证经济允许的前提下,最大限度提高地震资料的分辨能力,真正做到“振幅保真、信噪比高、分辨率高”,获得高品质原始地震资料,以能够较好地满足叠前反演的要求。

4.2.2 发展页岩气高分辨率地震资料处理配套技术

页岩气气藏与常规的构造型油气藏和砂岩岩性油气藏有差异。针对页岩气埋藏浅、低波阻抗、弱反射,页岩气储层与有效厚度及裂缝发育带有密切关系,页岩气地质目标要求地震资料实现严格的保幅和提高分辨率处理;进行各向同性叠前时间偏移和各向同性叠前时间偏移处理,保护地震资料中所“隐藏的”小断层,保护储层弱信息,有效提高优质页岩层和可能的薄砂体的识别能力和精度;开展多参数叠前反演提取页岩气有效的地球物理和岩石物理信息;利用井间地震(或VSP)资料提取井周高分辨信息;搞好井地联合处理,提高三维地震的分辨率。

4.2.3 发展页岩气地震识别综合预测技术

4.2.3.1 落实目标页岩气层区域展布特征

借鉴过去相对成熟的常规油气勘探地震描述技术,从井震联合层位标定入手,分析建立页岩气目标层及优质页岩储层的地震反射波形特征(图2),在地震剖面上进行常规精细资料解释,确定目标页岩层及优质页岩层深度、厚度及分布范围,并获得页岩层构造形态、断层展布及可能的水层和溶岩等特征。另外,发现含气页岩中的粉砂也很重要,粉砂颗粒组分(特别是石英)提供了很大的空隙度,这对于水力压裂早期高采收率非常重要。图2中筇竹寺组表现为:整段为优质页岩与普通页岩互层发育,它们之间具有一定波阻抗差,形成较为稳定的界面,整体表现为平行—亚平行反射。

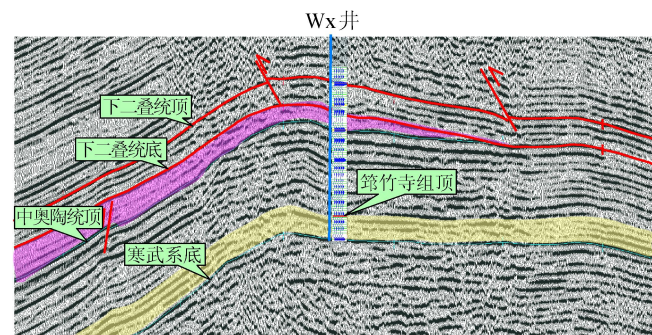


图2 Wx井合成地震记录层位标定图

4.2.3.2 进行优质页岩气层预测技术攻关

以测井岩—电关系为基础,建立页岩气储层特征与地震反射波响应特征及地震反射波敏感动力学参数

关系,形成页岩气储层分析及解释模型,利用多属性融合技术及多参数叠前反演技术预测优质页岩气层发育区域。

4.2.3.3 开展页岩气层孔隙、裂缝地震预测及岩石物理参数反演技术攻关

通过地震属性相干分析、曲率研究,分析含气页岩裂缝密度、方位、裂缝强度及地层最大水平主应力方向等;通过分方位叠前波阻抗反演和泊松比反演^[10]等,分析含气页岩岩石密度,孔隙度趋势,确定页岩气层地震各向异性等。

4.2.3.4 发展页岩气井轨迹三维空间跟踪技术

利用地震识别和综合预测成果,采用三维地震可视化技术设计水平井轨迹,直观、准确地确定钻探目标,指导钻井在构造相对平缓的区域,避开大断层、复杂结构地层和解释可能的地层溶岩(会抑制和破坏页岩气的生产),穿过优质页岩厚度较大、小断层及微裂缝较为发育区域,以沿垂直于裂缝发育方向穿过,尽量增加井筒与裂缝连接的可能性,以提高钻探成功率和开发效益。

4.3 发展页岩气井中地震技术

井中地震技术是在地面地震技术基础上向“高分辨率、高信噪比、高保真”发展的一种地球物理手段,在油气勘探开发中,可将钻、测井和地震技术很好的结合起来,成为有机联系钻测井资料和地面地震资料对储层进行综合解释的有效途径。

4.3.1 微地震监测技术

微地震监测是一种用于油气田开发的新地震方法,该方法优于利用测井方法监测压裂裂缝效果,在压裂施工中,可在邻井(或在增产压裂措施井中)布置井下地震检波器,也可在地面布设常规地震检波器,监测压裂过程中地下岩石破裂所产生的微地震事件,记录在压裂期间由岩石剪切造成的微地震或声波传播情况,通过处理微地震数据确定压裂效果,实时提供压裂施工过程中所产生的裂缝位置、裂缝方位、裂缝大小(长度、宽度和高度)、裂缝复杂程度,评价增产方案的有效性,并优化页岩气藏多级改造的方案。图3、4以直井为列展示了微地震监测压裂裂缝的微地震事件。从图4可以看出微地震活动性表征的复杂裂缝系统显示,裂缝模式随时间推移而扩展。

4.3.2 其他井中地震技术

由 Zero-Offset VSP、Offset VSP、Walkaway VSP、Walkaround VSP逐步发展到3D VSP技术,都

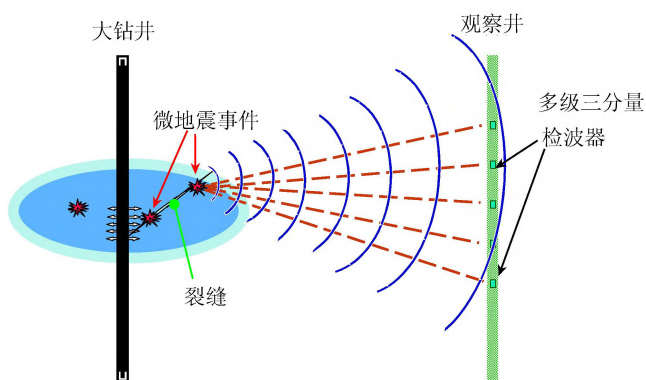
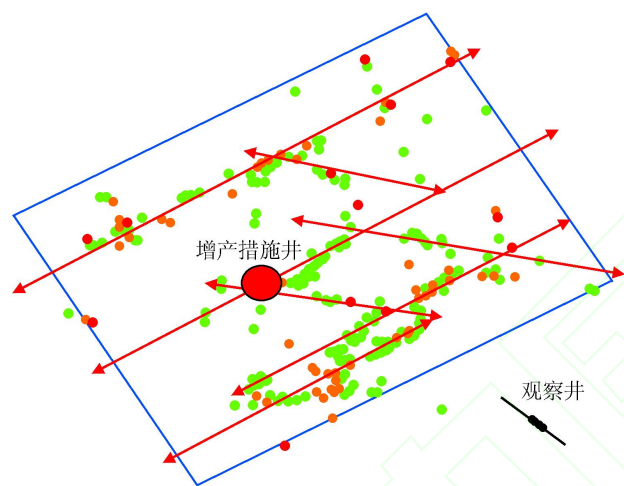


图3 微地震监测示意图

图4 微地震监测压裂裂缝的微地震事件图
(据 Weatherford 公司)

是较为成熟的井中地震技术。其中,3D VSP 技术和微地震采集配套施工配合监测储层改造人工裂缝发育分布状况是国外石油大公司的通常做法。3D VSP 观测是一种可靠的识别裂隙方向和裂隙密度分布的方法,3D VSP P-P 和 P-S 成像用于陆上构造解释,可大大改善纵、横向分辨率和断裂系统分辨率。3D VSP 测井与地面地震结合体现了综合地震勘探能力。此外,四维地震可用于检测在生产过程中,随着温度压力变化页岩气(游离气及吸附气)的变化情况,以助页岩气开发优化开采。井驱动地震数据处理是一种提高地震数据处理水平和质量的手段,也是发展趋势,使用这种技术配套,需要提高地震资料处理技术人员的整体水平。

5 结论与认识

1)页岩气地震预测和储层测井识别评价技术是优化页岩气钻井及储层压裂改造部署的必要技术支撑。

2)必须在加强对页岩气岩石物理认识和发展测井识别评价技术系列基础上,紧紧围绕页岩气低孔、低渗、微裂缝特征的地震精细描述目标,加快形成适合我国南方海相页岩气地震勘探配套技术步伐。

3)3D VSP 技术联合微地震监测技术是压裂裂缝监测的有效手段,井中地震与地面地震的联合是提高页岩气综合勘探能力一种必然发展趋势。当前急需加强井中地震数据采集技术创新,其数据处理和资料解释技术亟待研发。

参 考 文 献

- [1] 齐慧,江书程.页岩气:在石缝中挖掘出的“真金”[N].经济日报,2010-08-24(16).
- [2] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
- [3] 张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- [4] 陈更生,董大忠,王世谦,等.页岩气成藏机理与富集规律初探[J].天然气工业,2009,29(5):17-21.
- [5] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
- [6] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
- [7] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.
- [8] 斯伦贝谢公司.页岩气藏的开采[J/OL].油田新技术,2006(4):18-31. <http://slb-sis.cn/toc/2006/Autumn2006-4.pdf>.
- [9] 张卫东,郭敏,杨延辉.页岩气钻采技术综述[J].中外能源,2010,15(6):35-40.
- [10] PADDOCK D,STOLTE C.Seismic reservoir characterization of a gas shale utilizing azimuthal data processing,pre-stack seismic inversion,and Ant Tracking[C/OL].2008 CSPG CSEG CWLS Conference.<http://www.cspg.org/conventions/abstracts/2008/abstracts/207.0pf>.

(收稿日期 2011-01-24 编辑 韩晓渝)