

页岩气地质工程一体化导向钻井技术

陈颖杰¹, 刘 阳², 徐婧源³, 邓传光¹, 袁和义²

(1. 中国石油西南油气田分公司勘探事业部, 四川成都 610041; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500; 3. 中国石油西南油气田分公司输气管理处, 四川成都 610500)

摘 要:为最大限度地挖掘页岩储层潜力, 提高水平井勘探开发效果, 研究应用了页岩气地质工程一体化导向钻井技术, 包括: 在深化页岩储层认识和准确预测“甜点”的基础上, 建立了精细三维地质模型; 根据三维地质模型提取的地层参数进行井眼轨道优化设计; 采用储层预测技术, 落实目的层微构造变化, 从而为水平段井眼轨迹预测提供地质依据; 采用地质目标跟踪及轨迹调整技术, 准确预测井底钻头位置, 估算真实地层倾角并实时修正地质模型, 确保井眼在储层中合理位置延伸。地质工程一体化技术在四川盆地 NH2-4 井进行了应用, 确定水平段位置距优质页岩底界 35.00 m, 校正真实地层倾角为 6.48°, 实时修正地质模型并调整井眼轨道设计参数, 实现优质储层钻遇率 94.5%。研究结果表明, 页岩气地质工程一体化导向钻井技术, 为页岩气开发提供了实用可行的集成技术。

关键词:页岩气 储集层 地质模型 井眼轨迹 导向钻井 一体化 NH2-4 井

中图分类号: TE242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2015)05-0056-07

Integrated Steering Drilling Technology for Geology Engineering of Shale Gas

Chen Yingjie¹, Liu Yang², Xu Jingyuan³, Deng Chuanguang¹, Yuan Heyi²

(1. Exploration Business Division, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 3. Gas Management Office, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: In order to best tap the potential of shale reservoirs and optimize the placement of horizontal wells during exploration and development, an integrated steering drilling technology was researched and developed in this paper. First, after an in-depth understanding of the shale reservoir was achieved, a high-resolution 3D fine geologic model was developed that could accurately predict “sweet spots”. Second, optimization design was conducted on the well trajectory on the basis of the formation parameters extracted from the 3D geologic model. Third, microstructure change of target zones was ascertained by using reservoir prediction technologies, so as to provide the geologic basis for the well trajectory prediction. Fourth, the position of the bit was predicted in the hole accurately by means of geological target tracking and trajectory adjustment technologies. And finally, real-time modification was conducted on the geologic model by estimating the real formation dip, so that the well trajectory could be extended reasonably in the reservoirs. The technique was applied in Well NH2-4 during the drilling of its horizontal section. And based on the technique, it was 35.00 m from the horizontal section to bottom boundary of high-quality shale, and the corrected formation dip was 6.48°. The geological model was real-time modified and the trajectory parameters were adjusted for time, so high quality reservoir drilling rate achieved 94.5%. It is shown that the integrated steering drilling technology for geologic engineering provided a practical and feasible integration technology for the development of shale gas.

Key words: shale gas; reservoir; geologic model; hole trajectory; steering drilling; integration; Well NH2-4

四川盆地页岩气藏初期勘探开发成果表明, 水平井钻井完井技术和大型水力压裂技术是实现页岩气藏高效开发的有效技术。但受地质结构复杂、地层倾角变化大、页岩气“甜点区域”预测不准、完钻井储层改造效果不理想及开发成本高等因素制约, 四川盆地页岩气开发效果不理想。究其原因, 除我国页岩气高效开发核心技术推广扩散力度不够、适应性差外, 更为突出的是存在地质评价、工程设计和现

收稿日期: 2015-03-04; 改回日期: 2015-08-26。

作者简介: 陈颖杰(1984—), 男, 四川成都人, 2009年毕业于西南石油大学石油工程专业, 2012年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 工程师, 主要从事油气井工程生产技术相关研究及管理工作。

联系方式: 15002892369, chenyingjie@petrochina.com.cn。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“页岩气水平井钻井关键基础研究”(编号: 2013CB228003)和四川省科技创新苗子工程培育项目“页岩水平井过钻头测井数字样机开发”(编号: XNSIJS(2014)51)联合资助。

场施工相互脱节的问题^[1-2]。因此,要想解决该问题,就必须突破常规“面向单井、面向单项、面向局部”的开发思路,采用“工程服从地质、地质兼顾工程”的一体化开发模式。地质工程一体化导向钻井技术作为一体化开发模式的重要组成部分,是一种将地质导向理念与地质研究、三维地质建模、井眼轨道设计、随钻跟踪分析及评价调整有机结合的集成技术,能在钻井过程中通过随钻录井和井眼轨迹控制,达到准确中靶和优化地质模型的目的;在储层箱体钻进中,能够根据随钻录井及测井、地震解释、钻井工艺和水平井轨迹控制等技术,进行井眼轨迹的实时跟踪和调整,进而优化水平井勘探开发效果。因此,采用地质工程一体化导向钻井技术,可以实现工程技术与储层条件的匹配,加快页岩气储层的规模化有效开发。

1 页岩气藏地质特征及勘探开发难点

储层埋藏深,成藏地质条件复杂 页岩气藏与常规天然气气藏的成藏机理和聚集方式有很大差别^[3],且具有明显的区域各向异性。与北美页岩气藏构造稳定、地层平缓的地质特征相比,四川盆地页岩气藏由于受构造运动的影响,地层比较破碎,在地表主要表现为山地丘陵特征,浅层有暗河,溶洞和裂缝发育,且储层埋藏深度普遍较北美典型页岩气藏深(见图 1)^[4-5]。此外,由于受构造运动和成岩作用影响,四川盆地页岩地层地应力属于走滑断层应力机制,且页岩层理发育,强度具有明显的各向异性,其最显著特征表现为页岩强度在不同取心方向上的差异。

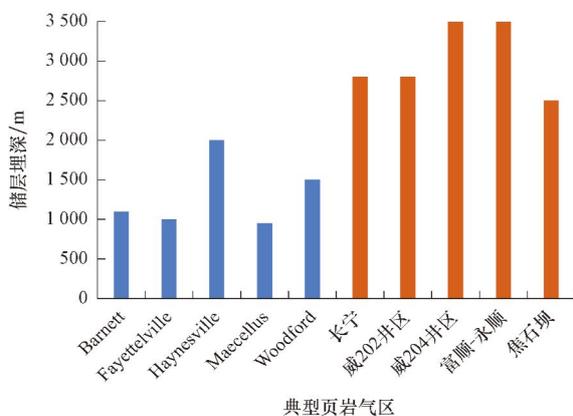


图 1 四川盆地与北美主要页岩气区储层埋深对比

Fig. 1 Reservoir buried depth comparison between Sichuan Basin and North American shale gas

储集条件差,储层识别评价和预测难度大 页岩气主要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。储集层由岩化的黏土、有机物质和矿物质混合而成,储集空间由裂隙和微裂缝组成,具有典型的低孔低渗物性特征^[3]。要实现页岩气藏的有效开发,必须采用集有利区优选、水平井导向钻井及水力压裂技术于一体的综合技术。在优选有利区和确定钻探目标时,需要全面分析预测有利的页岩气生储地质条件,钻探目标应选在有机质与硅质富集、孔隙及裂缝发育的优质页岩储层。在钻井过程中,井眼应该在垂直于主要裂缝网络系统的方位延伸,这样能够形成众多横向诱导裂缝,为后期压裂改造创造条件。在进行储层改造时,力争形成复杂的网状裂缝,从而使气藏压力降的传播范围最大化。

地质模型可靠度低,设计轨道与实钻轨迹偏差大 准确的地震资料和详实的区域地质信息是建立可靠地质模型的基础。国外利用二维地震资料进行页岩气开发有利区评价,利用三维地震资料进行水平井部署,并采用三维地震可视化技术进行水平井井眼轨道优化设计,形成了集数据采集、数据处理及解释、地质建模、钻井完井优化设计等于一体的完整开发技术。然而,国内页岩气地震勘探仍以二维地震勘探为主、三维地震勘探为辅,还未形成集成地震精细处理与反演、构造分析、多井岩性及测井曲线对比的储层精细地质建模技术,建立时地质模型高度依赖区域地质信息和区块建模经验,从而导致地质模型可靠度低,难以有效应对储层段提前等突发情况。尽管目前采用“井下动力钻具+MWD+LWD(伽马测井)”导向钻井技术,井眼轨迹控制遵循“稳斜探顶,复合入窗”的原则^[4,6],在一定程度上提高了储层地质不确定性的应对能力,但伽马测井资料不足以有效区分产层和非产层,更无法用于靶体优化和储层改造方案设计。

2 地质工程一体化技术需求分析

所谓地质工程一体化技术,是指从事地质、物探、油气藏工程、钻井完井工程等专业的甲乙双方技术人员,共同参与油气勘探开发工程技术方案的制订,同时跟踪管理技术服务全过程,实现对开发建设项目的地质研究、工程服务和生产管理的一体化运作^[7]。尤其是在当今油气勘探开发对象由常规资源向非常规资源转变的形势下,技术和管理层面均呈

现出对地质工程一体化技术的迫切需求。然而,与国外面向气藏开发全生命周期的一体化开发技术相比,国内“协作型”和“主导型”的地质工程一体化服务模式仍处于技术发展的初级阶段,且技术适应性差。究其原因,在于忽视了页岩气藏开发的以下关键点:1)注重有利区优选和“甜点”区评价;2)完井压裂一体化,综合指导钻井工程设计;3)不过分依赖区域地质信息,重视单井地质参数变化。就一体化导向钻井技术而言,国外率先实现了地质导向硬件工具与软件系统的有机融合,而且正朝着随钻测量仪器多样化、测量参数趋向近钻头智能化、基于地质-钻井可视化的地质建模、实时对比解释和钻井过程系统化的方向稳步发展。国内集地质研究、地震解释、随钻测井和录井、水平井钻井技术为一体的导向钻井技术尚处于发展初期,且集成的实时跟踪与解释软件尚未配套^[8],不利于提高决策效率。

3 地质工程一体化导向钻井关键技术

随着水平井技术的不断发展,国内外水平井钻井理念由最初的钻成水平井逐渐转变为地质与工程相结合的一体化钻井技术,以达到最佳储层钻遇率的目的。与此同时,地质研究与地质目标跟踪在水平井钻井中的重要性也日渐突出。

3.1 测井识别评价技术

页岩气藏与常规气藏在成藏地质条件及储渗状态等方面存在较大差异,从而决定了页岩气藏与常规气藏测井评价方法的不同。目前页岩气勘探开发过程中,除采用常规三组合测井系列外,地球化学测井、偶极声波成像测井及电成像测井等测井方式也被广泛采用,目的是定性识别页岩气藏、评价页岩生烃潜力及储集层参数、获取地层岩石力学参数、评价地应力分布和裂缝参数等^[3,9-10]。与普通页岩相比,优质页岩储层具有自然伽马、电阻率和声波时差高,补偿中子、地层体积密度和光电效应低等测井响应特征。这些响应特征为“甜点”区域预测、精细地质建模、钻井完井设计和水力压裂设计等提供了必要的技术支持。

目前国内页岩气水平井钻井中,普遍采用“井下动力钻具+MWD+LWD(伽马测井)”技术进行水平段地质导向钻进,利用自然伽马数据进行目的层标定。然而,利用伽马测井数据能不能进行储层精细描述,更不能实现射孔和压裂的优化设

计。为此,近年来国外油田技术服务公司开发出了不受井眼轨迹和地质条件影响的过钻头测井技术(through bit logging, TBL)^[11-12],过钻头测井仪器组合如图2所示。该技术在北美非常规资源开发中应用广泛。

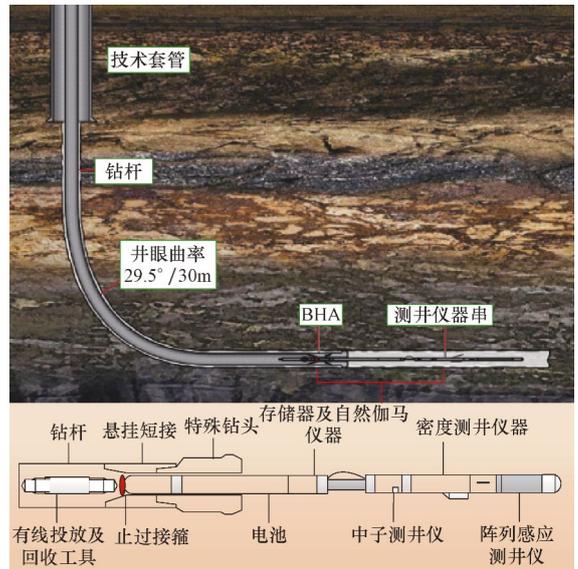


图2 过钻头测井仪器串组合

Fig. 2 Through-bit-logging (TBL) series assembly

国内过钻具存储式测井技术采用无电缆测井方式,测井时将仪器安装在钻具内,整套仪器通过释放销钉悬挂在上悬挂器和仪器保护套内,钻具将仪器下至井底后,通过钻井液脉冲信号或投球使测井仪器从上悬挂器释放,进入测量井段。同时利用仪器自带电池短节进行供电,采用自带的存储芯片进行数据采集和存储,采用时间-深度测量方式对测量数据按深度进行校正。该技术解决了复杂井况条件下测井资料采集的难题,基本能满足页岩地层评价需求,达到测井提速、提效、降低成本和 risk 的目的。目前,国内过钻具存储式测井技术仍面临采集数据质量不高、数据反馈效率低、仪器串抗风险能力差等缺陷,仍需逐步改进和完善。

3.2 “甜点”区域预测及评价

“甜点”区域是指页岩气相对富集、裂缝裂隙发育、易压裂且压后能形成可观的 ESRV 的页岩区域。该区域的准确预测是页岩气规模开发取得成功的关键技术之一。周德华等人基于页岩气地质选区及资源潜力评价方法,分析北美地区主要页岩气盆地的关键参数变化^[13-14],结合四川盆地页岩气实际地质特征,提出了“10 参数法甜点评价”体系^[15],并

对核心参数指标进行区间划分和人为区间赋值,形成了适合四川盆地页岩气“甜点”预测的核心参数判别方法。页岩气“甜点”区域预测的基本思路是:以页岩气成藏地质条件、成藏主控因素为指导,以页岩气勘探“甜点”预测为核心,研究目的页岩层及优质

页岩层埋深及构造展布特征,结合地震资料的解释成果,利用地震属性提取与分析技术、井约束叠前叠后多参数地震反演以及测井评价等特殊处理方法^[16-17],实现页岩有利“甜点”区域的准确预测。“甜点”区域预测与评价流程如图 3 所示。

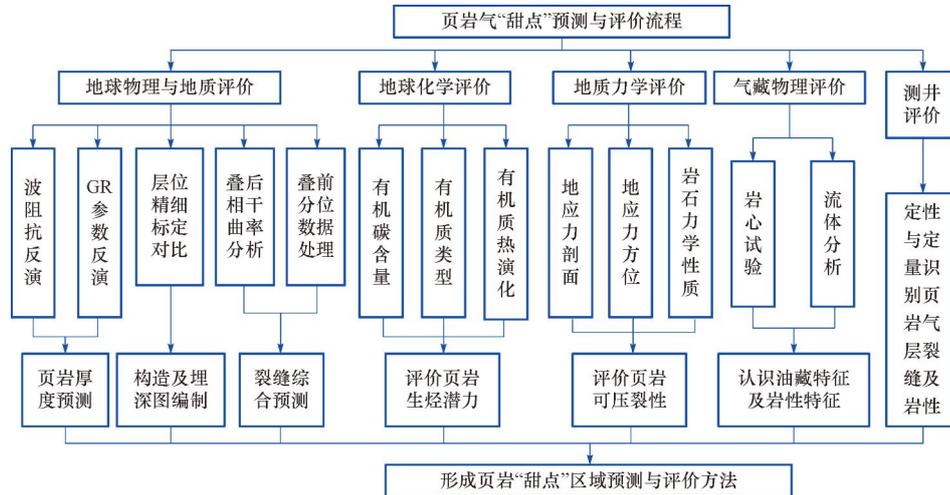


图 3 页岩气“甜点”预测与评价流程

Fig. 3 Prediction and evaluation workflow of shale gas “sweet spot”

3.3 储层预测技术

储层预测技术是页岩气地质导向钻井实施的前提,主要包括微构造预测研究和水平井井眼轨迹地质剖面预测技术。水平井储层预测基本流程如图 4 所示。

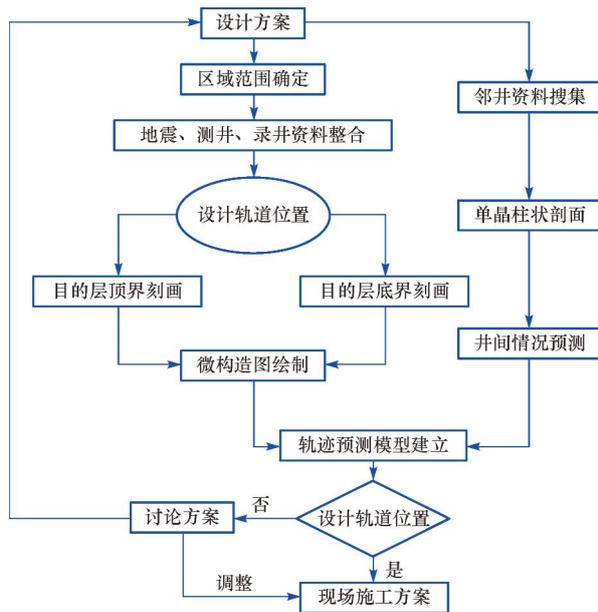


图 4 水平井储层预测流程

Fig. 4 The flow chart of reservoir prediction for horizontal wells

微构造预测研究在水平井地质目标跟踪过程中起到至关重要的作用,其研究的基础是水平井邻井测井、录井资料以及地震勘探资料,通过详细对比并全面分析储层变化规律,从而获得储层顶底界微构造,再对目的层微构造变化进行精细描述,以直观反映目的层在水平方向上的起伏变化规律,进而为水平段井眼轨迹预测提供可靠的地质依据。井身剖面地质预测是基于地质工程提供的不同深度岩性、厚度、储层展布等参数和微构造研究结果,落实目的层地层产状、厚度变化、岩性、含气性,再根据轨道设计参数,建立二维轨道方位上的预测地质剖面,从而计算出造斜点至靶点不同岩性段轨道深度、开采目的层顶底界面埋深、油气水界面垂深等地质参数。钻井工程人员将根据这些参数进行科学的井眼轨道和钻具组合设计。

3.4 基于地质目标跟踪的轨迹调整技术

3.4.1 井底钻头位置预测技术

井底钻头位置预测主要通过地层岩性、含气性及测井响应特征等进行识别预测,从而正确判断钻头在目的层中的位置,这是水平井井眼轨迹控制和纵向调整的关键^[18-20]。对优质页岩储层而言,其具有自然伽马和电阻率高的测井响应特征,且储层内钻时、含气性相对稳定。因此,可将自然伽马、电阻

率、钻时及含气性等测井响应特征作为储层预测剖面可靠性评价的判别标准。当目的层实际构造产状与钻前预测结果一致时,储层测井响应特征趋于稳定,可根据实钻轨迹参数和储层特征参数预估当前钻头所处储层位置及纵向变化;当目的层实际构造产状与钻前结果不一致时,可以根据 LWD 测井响应特征和井眼轨迹进行分析判断。随钻电阻率受测量条件和范围的限制,当测量半径范围内无泥岩和夹层影响时,自然伽马、电阻率变化相对稳定,钻时和岩屑含气性变化不大,此时可根据钻前预测剖面,结合当前钻井参数,对待钻井眼轨道进行初步预测;当测量范围内受到围岩影响时,电阻率下降,自然伽马值增大,此时需要对井眼轨迹位置进行判定,即通过分析井眼轨迹的变化趋势,结合井斜角、岩屑和钻时等变化规律,对钻头位置作出正确判断。此外,利用随钻测井数据电阻率与储层纵向沉积变化的对应关系也可以判断钻头在储层中的位置。

3.4.2 实际地层倾角估算

页岩地层储层段均存在一定程度的非均质性和各向异性,且储层段通常有一定的倾角(4°~7°)或起伏不平的情况,一旦地震资料分辨率不能有效识别储层,就必须在导向钻井过程中及时预测钻头钻出储层的可能性。为此,基于储层倾斜方向和钻头钻出储层的方式,即储层下倾且钻头沿储层底界穿出(图 5(a))、储层上倾且钻头沿储层底界穿出(图 5(b))、储层下倾且钻头沿储层顶界穿出(图 5(c))和储层上倾且钻头沿储层顶界穿出(图 5(d)),提出了 4 种估算地层倾角的计算方法(见图 5)。

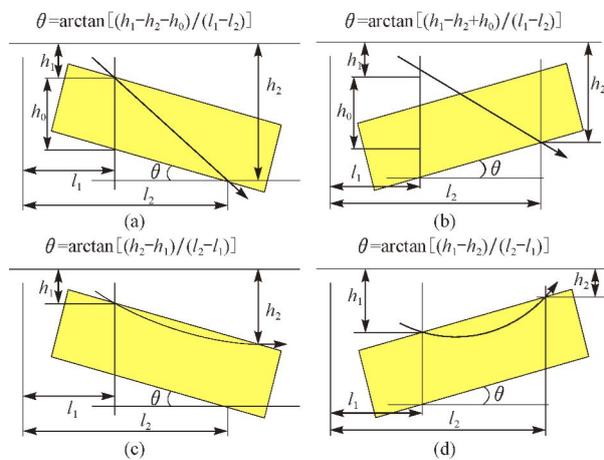


图 5 钻头钻出储层后的实际地层倾角估算

Fig. 5 The estimation of actual dip angle after the bit drilling out of the reservoir

图 5 所示各计算公式中,θ为地层倾角,hi为着陆点海拔高度,h2为钻出储层位置处海拔高度,h0为储层视厚度,l1为着陆点水平位移,l2为钻出储层位置处的水平位移。需要注意的是,该地层倾角估算值并不能完全代表储层实际情况,但可为导向钻井提供参考。

3.4.3 水平段井眼轨迹纵向调整技术

水平段井眼轨迹纵向调整技术是导向钻井过程中地质目标跟踪的核心内容,是确保井眼轨迹在储层中合理位置延伸的关键。钻井过程中,将随钻测井结果和地质分析结果实时标注在已经形成的预测剖面 and 平面图上,通过对比实测信息和预测信息,预测待钻地层与当前钻井参数的配伍性,从而及时调整轨道参数和钻井参数,最大限度地保障井眼轨迹在储层内的最佳位置。

对于厚度大、横向分布范围广且各向异性明显的页岩地层,运用导向钻井技术进行地层评价,引导水平井优快安全钻井,已成为目前页岩气水平井优快钻井配套的关键技术之一。目前国内普遍采用“井下动力钻具+MWD+LWD(伽马测井)”导向钻井技术,力求页岩地层水平段井眼轨迹沿理想设计轨道钻进,但有限的伽马测井资料无法保证储层精细描述的准确性。因此,加强储层测井评价,进而辅助实施地质工程一体化导向钻井技术,是实现经济高效地质导向的关键。

4 现场应用

以 NH2-4 井为例,介绍地层工程一体化导向钻井技术的现场应用情况。该井为四川盆地 NH2 平台部署的一口开发井,目的层为龙马溪组发育的 2 套页岩储层,其中 2 400.00~2 479.00 m 井段为有利页岩段,层厚 79.00 m,2 479.00~2 525.00 m 井段为优质页岩段,层厚 46.00 m。该井靶区箱体位置依据邻井实钻及压裂成果资料确定,水平段箱体对应于龙马溪组的 2 485.00~2 495.00 m 井段,即水平段轨迹距优质页岩底界 35.00 m。该井设计入靶点垂深 2 315.00 m,地层倾角 6.86°,水平段长 1 000.00 m。

首先,进行导向钻井作业前对三维地震资料进行精细处理,追踪奥陶系组和龙马溪组顶部位置,弄清构造形态,沿井眼轨迹方向进行深度投影和波阻抗反演,理清储层展布情况,从而结合邻井测井资料

和区域上各层厚度建立钻前地质导向模型,如图 6 所示。其次,入靶段钻进作业中,根据实钻资料进行深度校正,再对下部井眼轨道进行重新设计,预设入靶点参数,制定轨迹控制措施,为准确入靶做准备。NH2-4 井暂定垂深 2 300.00 m 为入靶点深度,当钻至井深 2 395.00 m,井斜角 90.0° 时开始稳斜下探靶区,确定进入靶区箱体后增斜至 96.8° 入靶。钻至井深 2 532.00 m,随钻伽马值由 160 API 升至 180 API,气测及全烃无明显变化,岩性为灰黑色炭质页岩,经对比分析该井井眼轨迹已经进入高伽马页岩储层段。最终确定靶点 A 的详细参数(井深 2 568.00 m,井斜角 95.8° ,方位角 343.2°)。进入水平段以后,继续稳斜钻进至井深 2 575.00 m,随钻伽马值升至 200 API,说明井眼轨迹穿出高伽马

页岩段。为确保井眼轨迹能快速离开高伽马页岩段,回到上部设计靶区箱体内,继续增斜至 98.0° 向上钻进,钻至井深 2 610.00 m,随钻伽马由 200 API 降至 180 API,气测无明显变化,岩性为灰黑色炭质页岩,结合现场资料及邻井资料分析,井眼轨迹已经穿出高伽马页岩段,进入上部伽马值相对较低页岩段,对高伽马页岩段进行分析对比后,采用图 5(d)的计算方法和对应深度,计算出该井地层倾角为 6.48° 。钻至井深 3 000.00 m,井斜角 97.1° ,垂深 2 240.14 m,根据对比分析,井眼轨迹已经进入设计靶区箱体,进而将井斜角调整至 $96.5^\circ \sim 97.5^\circ$ 进行水平钻进,直至钻至设计井深完钻。钻后评价结果表明,优质储层钻遇率达 94.5%,验证了该技术的可操作性和准确性。

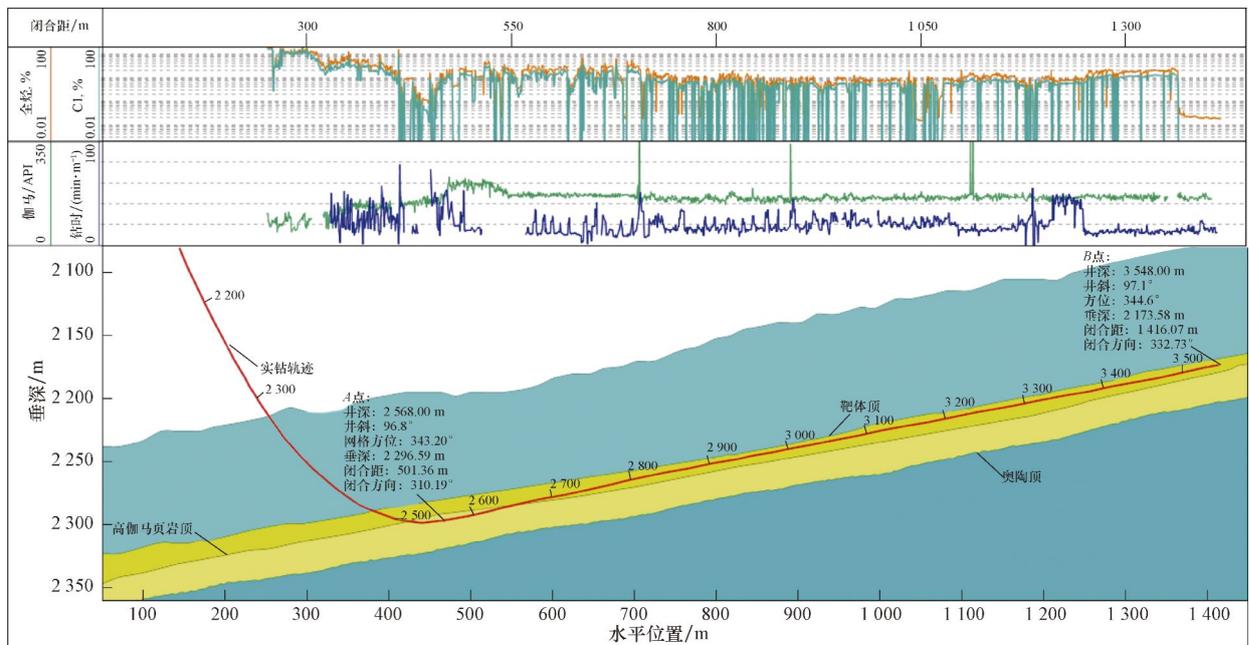


图 6 NH2-4 井完钻地质模型及全井导向轨迹

Fig. 6 The geological model and steering trajectory of Well NH2-4

5 结论及建议

1) 页岩气地质工程一体化导向钻井技术,即地质理论与水平井导向钻井设计及施工有机融合的一体化技术,是实现页岩气藏经济高效开发的有力保障。

2) 先进的地质导向硬件工具和与之配套的随钻测量仪器、测井仪器及解释软件相结合,可以最大程度地降低随钻测量和测井工具的故障率,精确引导地质目标中靶,提高储层钻遇率。

3) 建议构建水平井多学科可视化协同工作平台,建立地质和地球物理、油藏工程及钻井工程等的多学科协同工作环境,以便于对特殊轨迹井井身剖面进行可视化设计与分析,从而为精细地质导向钻井技术的推广应用提供技术支撑。

参 考 文 献

References

- [1] 牛新明. 涪陵页岩气田钻井技术难点及对策[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(4): 1-6.
Niu Xinming. Drilling technology challenges and resolutions in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014,

- 42(4):1-6.
- [2] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1):1-6.
Zeng Yijin. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1):1-6.
- [3] 罗蓉, 李青. 页岩气测井评价及地震预测、监测技术探讨[J]. 天然气工业, 2011, 31(4):34-39, 125.
Luo Rong, Li Qing. Log evaluation, seismic prediction and monitoring techniques of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4):34-39, 125.
- [4] 余雷, 高清春, 吴兴国, 等. 四川盆地页岩气开发钻井技术难点与对策分析[J]. 钻采工艺, 2014, 37(2):1-4, 115.
Yu Lei, Gao Qingchun, Wu Xingguo, et al. Drilling technical difficulties and countermeasures in shale gas development in Sichuan Basin[J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(2):1-4, 115.
- [5] 陈海力, 王琳, 周峰, 等. 四川盆地威远地区页岩气水平井优快钻井技术[J]. 天然气工业, 2014, 34(12):100-105.
Chen Haili, Wang Lin, Zhou Feng, et al. Rapid and efficient drilling of horizontal wells in the Weiyuan shale gas field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(12):100-105.
- [6] 唐嘉贵. 川南探区页岩气水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5):47-51.
Tang Jiagui. Discussion on shale gas horizontal drilling technology in Southern Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5):47-51.
- [7] 戴勇, 彭景云, 吴大奎, 等. 采用“工程地质一体化”技术服务模式提升工程服务企业整体经济效益:以中国石油川庆钻探工程公司为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(11):125-129.
Dai Yong, Peng Jingyun, Wu Dakui, et al. To improve the overall economic benefit of oil & gas industry engineering services companies: a case history of CNPC Chuanqing Drilling Engineering Corporation[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(11):125-129.
- [8] 刘德伦, 罗于海, 李立, 等. 水平井一体化地质导向在四川油气田的应用[J]. 录井工程, 2013, 24(1):42-45.
Liu Delun, Luo Yuhai, Li Li, et al. Integrated geosteering of horizontal wells in Sichuan oil and gas field[J]. Mud Logging Engineering, 2013, 24(1):42-45.
- [9] 王金彬, 李庆华, 白松涛. 页岩气储层测井评价及进展[J]. 测井技术, 2012, 36(5):441-447.
Wan Jinbin, Li Qinghua, Bai Songtao. Well logging evaluation in shale gas reservoir and its advances[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(5):441-447.
- [10] 刘双莲, 陆黄生. 页岩气测井评价技术特点及评价方法探讨[J]. 测井技术, 2011, 35(2):112-116.
Liu Shuanglian, Lu Huangsheng. Evaluation methods and characteristics of log evaluation technology in shale gas[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(2):112-116.
- [11] Runia J, Boyes J, Lodder R J. Through bit logging: applications in difficult wells offshore North Sea[R]. SPE/IADC 92256, 2005.
- [12] Runia J, Boyes J, Elkington P. Through bit logging: a new method to acquire log data[J]. Petrophysics, 2005, 46(4):289-294.
- [13] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [14] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay[J]. AAPG Explorer, 2005, 26(2):5-7.
- [15] 周德华, 焦方正. 页岩气“甜点”评价与预测:以四川盆地建南地区侏罗系为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2):109-114.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng. Evaluation and prediction of shale gas sweet spots: a case study in Jurassic of Jiannan Area Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(2):109-114.
- [16] 何光怀, 李进步, 王继平, 等. 苏里格气田开发技术新进展及展望[J]. 天然气工业, 2011, 31(2):12-16, 120.
He Guanghuai, Li Jinbu, Wang Jiping, et al. New progress and outlook of development technologies in the Sulige Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(2):12-16, 120.
- [17] 彭娉姿, 彭俊, 陈燕辉, 等. 四川盆地元坝地区大安寨段页岩气“甜点”地震预测[J]. 天然气工业, 2014, 34(6):42-47.
Peng Changzi, Peng Jun, Chen Yanhui, et al. Seismic prediction of sweet spots in the Daanzhai Shale Play, Yuanba Area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(6):42-47.
- [18] 李一超, 王志战, 秦黎明, 等. 水平井地质导向录井关键技术[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5):620-625.
Li Yichao, Wang Zhizhan, Qin Liming, et al. Key surface logging technologies in horizontal geosteering drilling[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5):620-625.
- [19] 徐显广. 新疆莫北油田砂砾岩油藏随钻跟踪地质目标钻井技术研究[D]. 成都:西南石油学院石油工程学院, 2001.
Xu Xianguang. The research on drilling techniques of following the geological target while drilling for sandstone conglomerate reservoir in Xinjiang Mobei Oilfield[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, School of Petroleum Engineering, 2001.
- [20] 窦松江, 赵平起. 水平井随钻地质导向方法的研究与应用[J]. 海洋石油, 2009, 29(4):77-82.
Dou Songjiang, Zhao Pingqi. The research and application of horizontal well geosteering method[J]. Offshore Oil, 2009, 29(4):77-82.

[编辑 刘文臣]