

四川盆地非常规气藏地质-工程一体化压裂实践与认识

王光付¹, 李凤霞^{1,2,3}, 王海波^{1,2,3}, 李军¹, 张宏¹, 周彤^{1,2,3}, 商晓飞¹, 潘林华¹, 沈云琦¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 102206;

3. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206)

摘要:地质-工程一体化理念和做法已广泛应用于非常规油气藏勘探开发,贯穿井位地质设计、钻井、完井、压裂投产全过程,但不同阶段和不同地质条件下侧重点有所差异。在涪陵页岩气田开发成功引进并完善了北美非常规地质-工程一体化压裂技术,但这一技术在新区探井压裂中的推广存在局限性。由于四川盆地沉积和构造类型具多样性和复杂性,盆地内非常规气探井的压裂测试无法获得工业气流现象突出,相邻或同一区块探井或评价井压裂产量差异大,主要原因是甜点的裂缝和地应力等地质-工程关键参数三维定量表征及建模精度不够,针对性的分段分簇、压裂优化设计及布缝控缝定量模拟技术手段欠缺。系统总结了地质-工程一体化团队在四川盆地复杂致密气和页岩气探井及评价井压裂方面的实践经验,通过开展地质、测井、地震、工程等多专业联合研究,定量表征非常规储层空间展布、物性、含气性、岩石力学及矿物含量、地层压力、应力场、天然裂缝等关键参数,建立了区域气藏三维地质-工程模型,利用模型进行压裂裂缝空间扩展模拟,优化射孔、暂堵、压裂液、支撑剂、排量等工艺参数,及时跟踪分析和调整必要的现场施工参数,从而增加有效改造体积、提高单井产能,探索并形成了地质-工程一体化压裂技术体系及方法流程,在普光千佛崖组致密气和林滩场页岩气等探区应用效果显著,为类似油气藏地质-工程一体化勘探与开发提供借鉴。

关键词:三维地质工程模型;压裂优化;天然裂缝;地质-工程一体化;致密气;页岩气;四川盆地

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to fracturing in unconventional gas reservoirs, Sichuan Basin and some insights

Wang Guangfu¹, Li Fengxia^{1,2,3}, Wang Haibo^{1,2,3}, Li Jun¹, Zhang Hong¹, Zhou Tong^{1,2,3}, Shang Xiaofei¹, Pan Linhua¹, Shen Yunqi¹

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China; 3. Key Laboratory of Shale Gas/Oil Exploration & Production, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: The concept of engineering integrated with geology originated and prevailing in North America has also been accepted and put into practice during the exploration and development of unconventional oil and gas in the rest of the world. It runs through the whole process that starts with well design, drilling and completion, and ends with fracturing and production, only with focus shifting along the way in adaptation to different geological conditions and exploration or development stages. The introduction of the integrated geology-reservoir engineering approach to fracturing in the Fuling shale gas field in Sichuan Basin has been quite fruitful except for some restrictions frequently felt during exploration activities in some frontier blocks. Due to the diversity and complexity of sedimentary and tectonics in the Sichuan Basin, exploratory/appraisal wells after fracturing are tested with greatly varying results (mostly with low gas flow) even if they are located in the same block or arranged closely to one another. This might be explained by an insufficient accuracy of 3D quantitative characterization and models for key geological engineering parameters such as fractures and in-situ stress in sweet spots, and a lack of adaptive quantitative simulation technologies such as optimal fracturing stage/cluster division, fracture geometry optimization and fracturing process control. This paper systematically summarizes the experiences of an

收稿日期:2022-07-11;修订日期:2022-08-20。

第一作者简介:王光付(1965—),男,博士、教授级高级工程师,油气田开发。E-mail: wanggf.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工股份有限公司科技部项目(P21039-3)。

integrated geological-reservoir engineering team gained during fracturing practice in exploratory and appraisal wells for tight gas and shale gas in the Sichuan basin. Their work includes a 3D geo-engineering model of regional unconventional gas reservoirs built with key parameters of geology and engineering such as spatial reservoir distribution, physical properties, gas content, rock mechanics, in-situ stress field, initial formation pressure, mineral contents and natural fractures based on multi-discipline collaboration of geology, well-logging, seismic survey and engineering. Furthermore, the team carried out a fracture propagation simulation based on the model and formed a specific integrative technology series and workflow that could enhance SRV and single well production through tracing and optimization of perforation and diversion parameters, fracturing fluid and proppant volume as well as pumping rate. The implementation of the approach in developing tight gas from the Qianfoya Formation, Puguang Gas field and shale gas from Lintanchang Block in the basin has been proven successful, thus providing a reference for the development of similar unconventional reservoirs.

Key words: 3D geo-engineering model, fracturing optimization, natural fracture, geology-reservoir engineering integration, tight gas, shale gas, Sichuan Basin

引用格式:王光付,李凤霞,王海波,等. 四川盆地非常规气藏地质-工程一体化压裂实践与认识[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1221-1237. DOI: 10. 11743/ogg20220517.

Wang Guangfu, Li Fengxia, Wang Haibo, et al. Application of an integrated geology-reservoir engineering approach to fracturing in unconventional gas reservoirs, Sichuan Basin and some insights[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1221-1237. DOI: 10. 11743/ogg20220517.

油气勘探开发实践中地质与工程相互结合由来已久,但地质-工程一体化理念和概念源于北美致密气和页岩油气开发^[1],利用地质、地球物理和地质建模等研究成果指导井网部署、井位设计优化、井工厂钻井、体积压裂改造、大数据和人工智能优化施工和生产参数,大幅度提高单井产能,实现了北美页岩气产量的飞跃。中国借鉴北美非常规油气开发的成功经验,引入了地质-工程一体化勘探开发理念^[2],针对常规难采未动用储量、非常规致密砂岩和页岩油气、复杂深层油气藏等进行了一体化的研究与应用,实现了四川盆地涪陵页岩气^[3]、准噶尔盆地吉木萨尔页岩油^[4]、塔里木盆地顺北超深断溶体碳酸盐岩油藏^[5]以及鄂尔多斯盆地苏里格致密砂岩气^[6]等不同类型储层经济效益开发。

地质-工程一体化的实施需要依托于多学科、多专业的高效融合,而建模和数模是实现融合的重要手段。根据公开文献报告,目前国内建模与数模研究主要是依托斯伦贝谢、贝克休斯等国外公司的成熟商业软件,开展从三维建模、压裂模拟到油气藏数值模拟优化^[7-9],但现有商业软件并不能完全适应中国地质特征复杂的非常规油气藏^[3,10]。以四川盆地为例,由于受多期沉积和构造运动等因素影响,储层普遍存在构造多变、整体差异性大、非均质性强等特点,非常规页岩气与致密气储层开发过程中面临以下问题:①整体资源量落实和动用程度低;②沉积环境复杂,储层类型多样、埋深差异性大、非均质性强、连续性差,物性和资源丰度差异性大;③天然裂缝为高产的重要因素,小

尺度天然裂缝识别难度大。亟需明确储层含气性、物性、天然裂缝分布、可压裂性以及压裂工艺适应性研究,提升压裂效果。然而,在多尺度复杂天然裂缝定量表征、强非均质储层综合甜点评价、非均匀复杂裂缝扩展模拟、压后复杂裂缝量化评价及地质-工程一体化融合等方面,依然是当前商业软件面临的重大挑战。

本文针对四川盆地非常规气藏难点问题,通过组建气藏精细表征和压裂设计优化团队,形成了基于测井、地球物理、地质建模及压裂工程的一体化研究模式,研发了适应页岩气、致密气等不同类型储层地质工程特征的综合甜点评价、三维地质工程建模、水力压裂模拟与压后效果定量评价等地质-工程一体化关键技术,应用于四川盆地普光千佛崖组致密砂岩气和林滩场深层页岩气勘探,实现了探井压裂产量突破。

1 区域地质概况

四川盆地为中国陆上第三大含油气盆地,面积达 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,发育多套优质烃源岩与油气成藏组合,天然气资源丰富。非常规气藏包括页岩气与致密砂岩气,沉积相类型包括海相、海-陆过渡相和陆相(图1)。勘探开发实践初步证实,四川盆地海相、海-陆过渡相和陆相3类富含有机质页岩都具备页岩气形成和富集的基本地质条件,但差异较大,其中海相页岩相比其他两种类型页岩,具有厚度大、有机质丰度高、含气量高、脆性好等特点,是中国页岩气最有利的开发区,目前已在下志留统龙马溪组实现商业开发。

2 地质-工程一体化压裂技术方法及流程

地质-工程一体化是以提高“缝网控制率、油气采收率与投资回报率”为目标,核心是通过精细构建“构造、储层属性、地质力学和离散裂缝”一体化共享模型,从单井到油气藏多尺度评价储层品质、完井品质和钻井品质,支撑钻完井、压裂改造和开发等工程应用,将开发工程融入地质-工程一体化研究和作业中,同时不断利用现场施工过程及时反馈的钻探工程、压裂改造、生产动态等资料对一体化共享模型进行实时更新。关于地质-工程-经济三要素相互关联和制约的综述较多^[18-19]。在非常规勘探和评价阶段,地质-工程一体化目的是通过地质指导钻井提高油气层钻遇率,通过地质指导分段压裂提高测试产量,寻求勘探突破。

北美非常规地质-工程一体化关键技术中的地质和工程“双甜点”评价技术、建模技术、水平井钻井地质导向技术、井工厂、压裂设计优化技术及软件平台、压裂液和支撑剂体系等,在四川盆地涪陵和威远气田开发中成功应用,并创新了山地复杂地表井工厂设计施工技术,但与北美相比,缺乏利用三维地质工程模型开展压裂定量模拟优化及自主知识产权软件等核心技术。四川盆地与北美盆地相比,非常规气藏地质和构造更加复杂,压裂难度大,而复杂地质条件下新区勘探压裂更有挑战性。涪陵和威远气田已形成的成熟压裂技术,不完

全适应于不同类型地质工程条件下的新区勘探,并且缺乏关键核心技术和定量计算模拟优化软件,造成新区探井和评价井压裂成功率低。通过对四川盆地百余口井页岩气和致密砂岩气探井和评价井压裂效果的分析发现,由于四川盆地地质条件的复杂性,同一区块勘探阶段单井压裂测试产量差异较大,分析原因是针对性的分段分簇、压裂优化定量计算模拟技术有效性、地质-工程一体化团队合作、以及不同专业之间配合求取天然裂缝和地应力等关键参数的相关技术,均存在不同程度的欠缺。经过不断探索和完善形成了四川盆地非常规气藏地质-工程一体化压裂技术流程(图2)。

地质-工程一体化中致密气和页岩气压裂技术流程基本一致,但地质甜点属性参数求取侧重点有所差异,如致密气河道砂体空间分布预测,页岩气的“四孔隙”和总有机碳含量(TOC)及天然裂缝分布预测。流程图中的基础数据包括研究区地质、工程数据和盆地内其他区块相同层位相关数据。测井综合研究需要结合岩心等计算井点的岩石矿物组分及含量、储层孔隙度和渗透率、含气饱和度、天然裂缝、地层压力、地应力大小和方向及岩石力学参数;其中页岩气孔隙度和含气饱和度参数的定量评价具有特殊性,下文将详细论述。地震与测井紧密结合,需要利用单井数据和岩石物理特性约束地球物理数据体计算,进而预测储层属性(储层厚度、岩性、物性和含气性)、构造、地应力、地层压力、岩石力学参数、断层与天然裂缝等空间

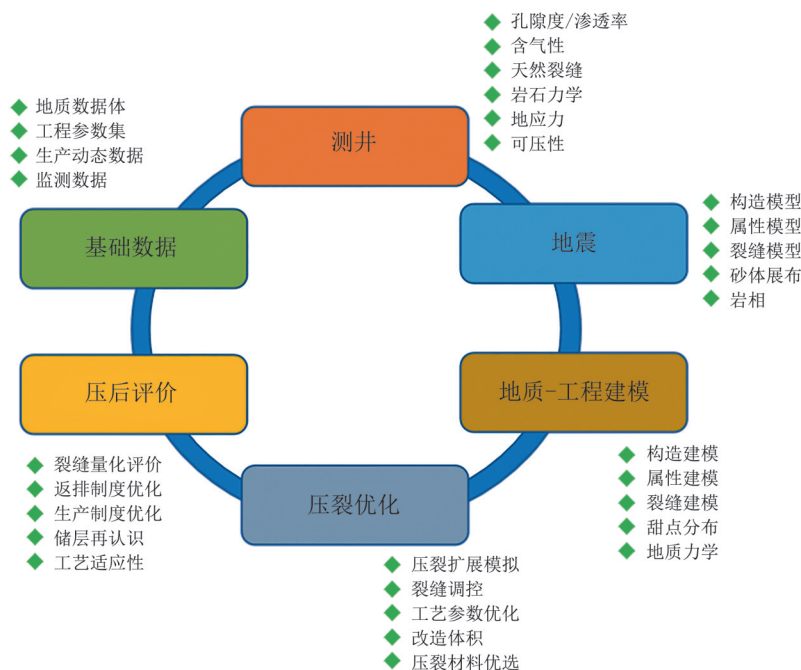


图2 四川盆地非常规气藏地质-工程一体化压裂技术流程

Fig. 2 Flow chart of integrated geology-reservoir engineering approach to fracturing for unconventional gas reservoirs, Sichuan Basin

展布;此外,页岩气还需要定量研究其 TOC 分布。地质-工程建模利用测井和地震综合研究成果,开展构造建模、岩相建模、属性建模、多尺度天然裂缝建模和地质力学建模,实现地质与工程的有机耦合,建立区域气藏地质-工程三维模型。压裂优化应充分运用地质-工程三维模型,尤其是考虑压裂水平段与天然裂缝、隔夹层、应力场等在三维空间的关系,开展针对性分段分簇及射孔参数优化、施工排量参数优化、压裂液体系和支撑剂类型组合优选等。压后评价是根据施工压力、微地震、产气剖面监测验证压裂设计,可以进一步验证地质-工程参数准确性并更新模型,利用非常规气藏数值模拟软件预测产能和优化生产参数。实现从基础数据到甜点关键参数求取,建立三维地质模型并在模型中开展压裂设计和优化,利用压后监测结果修正压前地质模型,构建地质-工程一体化压裂优化技术闭环。

3 地质-工程一体化压裂关键技术体系

针对复杂地质条件下的新区非常规气探井或评价井压裂,通过攻关和实践,形成了致密气和页岩气的地质-工程甜点参数定量评价、地质-工程模型建立、量化的复杂裂缝扩展和调控模拟、压裂效果评价等地质-工程一体化关键技术。

3.1 地质甜点参数评价与预测技术

3.1.1 天然裂缝评价与预测

1) 天然裂缝测井识别与定量评价

井壁成像测井是定性、定量评价裂缝最有效手段,但受测量成本和条件限制,目前只有在重点勘探和评价井中有井壁成像测量资料,大多数井是常规测井资料。为解决利用常规测井定性或定量评价裂缝的问

题,针对致密砂岩储层,选取电阻率降低、声波增大以及双侧向差异作为裂缝敏感因子(表1),从多个维度反映裂缝测井响应特征,分段采用灰色关联计算各因子权重系数获得裂缝识别曲线,与岩心观察结果和成像测井成果对比确定识别阈值,实现基于常规测井资料的裂缝定性识别。同时,针对性地研发感应、双侧向测量物理模拟装置与数值模拟技术,以此为基础建立裂缝参数定量表征方法^[20-21]。从而实现了基于常规测井资料有效识别层理缝、水平缝、斜交缝、高角度缝,并对开度、孔隙度和倾角等裂缝参数进行定量评价。

2) 地震预测天然裂缝

测井资料解释的裂缝倾角、方位、发育密度是地震断裂预测效果的重要标定对象和断裂提取参数优选的重要依据,可用于明确不同三维地震属性所蕴含的断裂信息地质意义。利用叠后地震相干属性、最大似然体刻画大尺度断层与中尺度裂缝带几何形态,基于叠前 $AVAZ$ 反演方法描述小尺度裂缝发育情况。为提高断裂与裂缝预测效果,在提取叠后地震相干与最大似然等属性之前,开展随机噪声衰减与构造导向滤波,压制噪声与非构造因素对断裂刻画的干扰,提高断裂几何属性的品质。叠前 $AVAZ$ 反演有利于获取高角度天然裂缝的密度与方位信息。在叠前 $AVAZ$ 反演之前对方位角道集进行各向异性时差校正,可消除速度各向异性对反演结果的影响。

3.1.2 岩相约束下页岩 TOC 评价

传统页岩 TOC 评价通常是采用 $\Delta \lg R$ 方法或者基于岩心刻度测井建立单因素或多因素经验公式来计算。对于岩性岩相复杂、非均质性强的页岩储层,测井响应复杂多变,传统方法评价 TOC 精度低。 TOC 与沉积环境和岩相分布密切相关,基于岩相约束的 TOC 评价方法可以大幅提高评价精度。引入神经网络方法,

表1 四川盆地致密砂岩裂缝识别测井敏感因子

Table 1 Logging sensitivity factors for identifying fractures in tight sandstone in the Sichuan Basin

敏感因子	因子形式	作用
电阻率降低因子	$\frac{\ln Rd_{env} - \ln Rd}{GR}$	识别各类裂缝
声波时差增大因子	$\frac{(AC - AC_{env})(1 - V_{sh})}{60}$	识别低角度裂缝与裂缝破碎带
电阻率幅度差因子	$\lg(Rs_{env}/Rs) - \lg(Rd_{env}/Rd)$	识别斜交缝、高角度缝
电阻率分形维度(约束指标)	$\sum_{i=1}^m \lg Rd_{i+1} - \lg Rd_i /m$	区分裂缝与孔隙层
声波分形维度(约束指标)	$\sum_{i=1}^m AC_{i+1} - AC_i /m$	区分裂缝与孔隙层

注: Rd, Rd_{env} 分别为深电阻率及其曲线包络线, $\Omega \cdot m$; GR 为自然伽马, API; AC, AC_{env} 分别为声波时差及其曲线包络线, $\mu s/m$; Rs, Rs_{env} 分别为浅电阻率及其曲线包络线, $\Omega \cdot m$; V_{sh} 为泥质含量, 小数; m 为层内采样点个数。

利用常规测井响应提取与灰质/介壳组分相关的岩相因子曲线,用以压制灰质/介壳组分对 TOC 评价的影响,实现 TOC 的精细评价。基于测井解释成果,进行岩石物理分析,优选 TOC 敏感弹性参数组合,设计 TOC 指示因子,利用地震叠前数据反演获得敏感参数数据体,实现 TOC 三维空间预测。岩相约束的有机碳含量测井评价方法如下:

$$TOC_{Lith} = TOC_{\Delta gR} (1 - aI_{Lith}) \quad (1)$$

式中: TOC_{Lith} 为岩相约束下的有机碳含量,%; $TOC_{\Delta gR}$ 为传统 ΔgR 方法的有机碳含量评价结果,%; I_{Lith} 为神经网络方法提取的岩相因子,无量纲; a 为岩性约束系数,无量纲。

3.1.3 致密气和页岩气含气性定量评价

对于致密气储层,可借鉴常规油气评价方法,基于岩电实验和测井响应机理分析优选并修正西门杜方程,即可实现含气饱和度的定量评价。然后,根据测井岩石物理特征分析,确定对含气性敏感的弹性参数及其门槛值,然后采用叠前反演方法,得到反映致密砂岩储层敏感参数的数据体。通过测井岩石物理分析,构建致密河道砂岩储层含气性与纵波阻抗、剪切模量(μ)和密度(ρ)等参数的相关关系。利用致密砂岩在地震剖面上的响应特征,采用地震波峰振幅预测出河道砂岩的外部轮廓,再利用叠前地震反演得到纵波阻抗数据体和 $\mu\rho$ 数据体,对优质砂岩储层和含气性进行检测,获得含气饱和度预测结果。

对于页岩气储层而言,由于页岩吸附气和游离气在地层条件下赋存状态、相态不同,常规储层饱和度评价方法不适用。为此,通过室内模拟地层条件,进行高温高压等温吸附实验,修正蓝格缪尔方程用于吸附气含量评价。然后,基于页岩孔隙中流体组分赋存机制及其主要地质因素,在确定总孔隙度和吸附气含量的基础上利用质量守恒原理计算游离气含量^[22]。

3.1.4 页岩四孔隙度高精度评价

与致密砂岩不同,页岩矿物组分复杂、孔隙结构复杂,孔隙分为有机孔隙和无机孔隙。有机孔隙发育于各种有机质中,与有机质热演化程度相关,无机孔隙包括粘土矿物中的孔隙、脆性矿物中的孔隙及贯穿其中的微裂缝。针对页岩岩性与岩石组分特征,基于所建立的岩石物理体积模型,利用测井响应方程,采用最优优化联立求解算法,确定矿物组分和总孔隙度。在此基础上,形成高精度页岩四孔隙度评价模型^[23-24],定量评价有机孔、粘土孔、脆性矿物孔和微裂缝4种孔隙度

(图3)。其中,多矿物组分测井响应方程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sh} + V_{Qt} + V_{F+D} + \dots + V_{gas} + V_{water} = 1 \\ GR = V_{sh} GR_{sh} + V_{Qt} GR_{Qt} + V_{F+D} GR_{F+D} + \dots + \\ V_{gas} GR_{gas} + V_{water} GR_{water} \\ \Delta t = V_{sh} \Delta t_{sh} + V_{Qt} \Delta t_{Qt} + V_{F+D} \Delta t_{F+D} + \dots + V_{gas} \Delta t_{gas} + \\ V_{water} \Delta t_{water} \\ \rho_b = V_{sh} \rho_{sh} + V_{Qt} \rho_{Qt} + V_{F+D} \rho_{F+D} + \dots + V_{gas} \rho_{gas} + \\ V_{water} \rho_{water} \\ \phi_N = V_{sh} \phi_{Nsh} + V_{Qt} \phi_{NQt} + V_{F+D} \phi_{NF+D} + \dots + V_{gas} \phi_{Ngas} + \\ V_{water} \phi_{Nwater} \\ \dots \\ \sqrt{C_t} = \sqrt{\frac{C_{water}}{a}} \times V_{water} + \sum_{i=1}^{nc} \left(\sqrt{\frac{C_{bw}}{a}} \times V_i \times WCLP_i \right) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $V_{sh}, V_{Qt}, V_{F+D}, V_{gas}, V_{water}$ 分别为岩石物理体积组分中的泥质、石英、长石、天然气、地层水百分比,%; $GR, GR_{sh}, GR_{Qt}, GR_{F+D}, GR_{gas}, GR_{water}$ 分别为岩石物理体积组分中的原状地层、泥质、石英、长石、天然气、地层水自然伽马,API; $\Delta t, \Delta t_{sh}, \Delta t_{Qt}, \Delta t_{F+D}, \Delta t_{gas}, \Delta t_{water}$ 分别为岩石物理体积组分中的原状地层、泥质、石英、长石、天然气、地层水声波时差, $\mu s/m$; $\rho_b, \rho_{sh}, \rho_{Qt}, \rho_{F+D}, \rho_{gas}, \rho_{water}$ 分别为原状地层、泥质、石英、长石、天然气、地层水体积密度, g/cm^3 ; $\phi_N, \phi_{Nsh}, \phi_{NQt}, \phi_{NF+D}, \phi_{Ngas}, \phi_{Nwater}$ 分别为原状地层、泥质、石英、长石、天然气、地层水中子孔隙度小数; C_t, C_{water}, C_{bw} 分别为原状地层、地层水、粘土束缚水电导率, S/m ; a 为岩-电参数孔隙度系数,无量纲; $V_i \times WCLP_i$ 为各粘土组分束缚水体积占比,由粘土体积 V_i 小数与粘土孔隙度 $WCLP_i$ 小数的乘积描述; nc 为粘土组分数,无量纲。

3.2 工程甜点参数评价与预测技术

3.2.1 脆性指数评价

系统进行岩石力学参数实验,利用纵横波速度和密度测井确定模型中泊松比、杨氏模量等力学参数,基于多因素地质统计方法建立测井计算岩石力学参数模型。基于岩石弹性参数估算相对脆性指数,通过叠前地震弹性参数反演得到纵波阻抗数据体、横波阻抗数据体和密度数据体,依据Rickman公式来估算岩石的脆性指数。岩石相对脆性指数(BI)公式如下^[25]:

$$BI = 50\% \times \left(\frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + \frac{v_{max} - v}{v_{max} - v_{min}} \right) \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量,GPa; E_{max} 为目的层段内岩石最大杨氏模量,GPa; E_{min} 为目的层段内岩石最小杨氏模量,GPa; v 为泊松比,无量纲; v_{max} 为目的层段内岩石最大泊

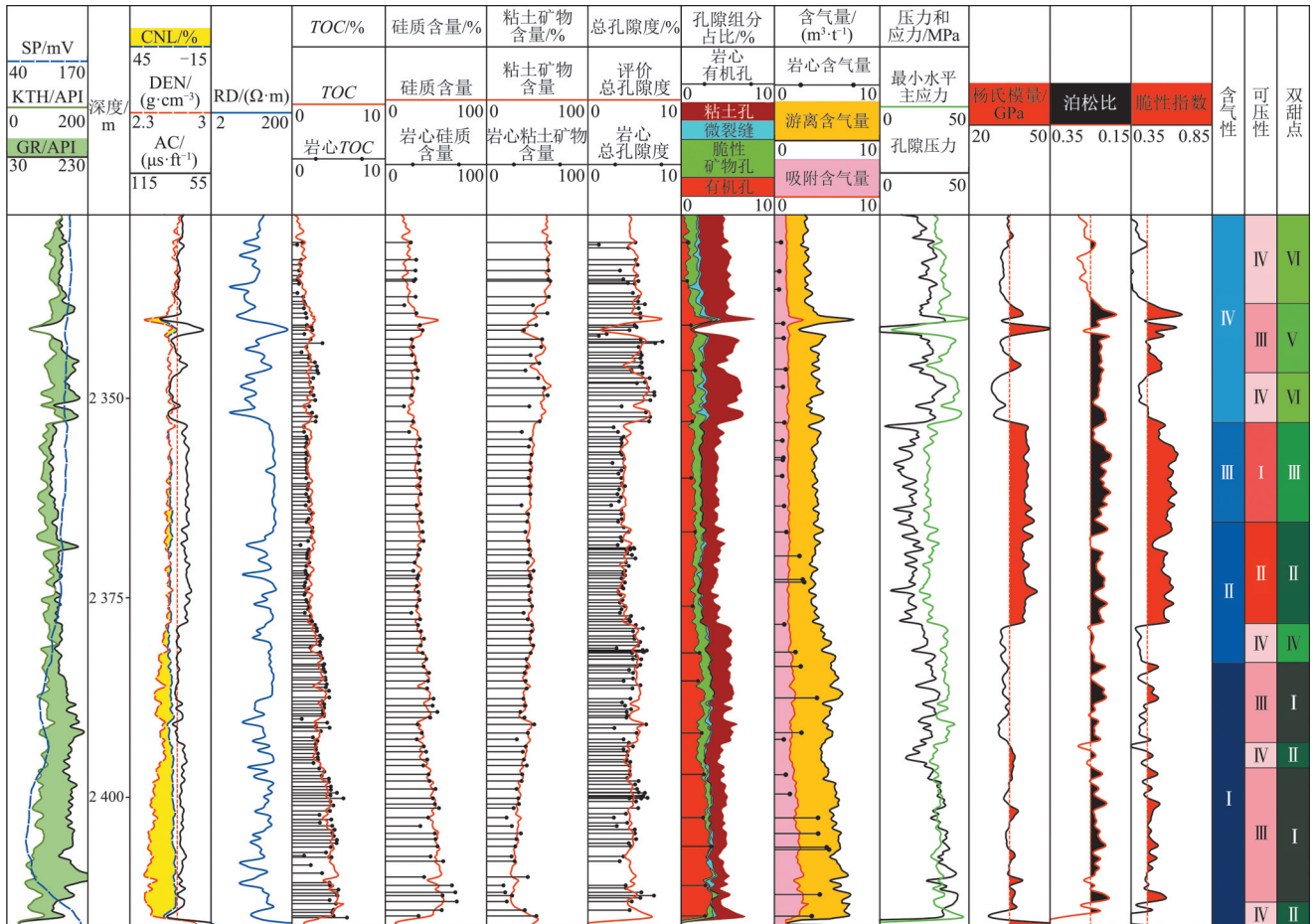


图3 四川盆地林滩场探区LY3井页岩气测井评价示意图

Fig. 3 Shale gas logging interpretations of Well LY3 in the Lintanchang Block, Sichuan Basin

松比,无量纲; $v_{\min}$ 为目的层段内岩石最小泊松比,无量纲。

3.2.2 地应力大小及方向评价

传统测井解释依据阵列声波快慢横波(S波)方位、电成像井壁崩落/诱导缝方向来确定现今主地应力方向,但这种方法不适用于难以发育诱导缝的偏塑性地层。大量实践和研究表明,原地岩心到地表过程中由于应力释放和微裂缝作用,声波速度在岩心周长方向产生各向异性,沿最大主地应力作用方向声波速度最慢、时差最大,而在最小地应力方向速度最大、时差最小。由于普通取心没有定向功能,井壁成像测井能够提供反映地下岩石结构高分辨率的定向井壁图像,通过井壁成像与连续岩心对比分析,可以对普通取心进行归位、定向,实现定向取心功能,然后利用纵波(P波)各向异性方位确定现今主地应力方向。基于弹性力学理论,建立测井评价现今地应力模型,并用成像测井、微注实验、现场压裂数据优化模型参数,提高地应力评价精度。基于井筒方向密度测井积分,确定垂向地应力,利用组合弹簧模

型确定水平方向最大和最小地应力值。

地震五维OVT数据中包含着地震波传播方位和反射信息,蕴含了井周地应力各向异性信息。利用OVT域叠前地震时间偏移归位后的分方位道集数据,井震结合实现叠前地震同时反演和AVAz反演,可得到纵波速度数据体,横波速度数据体、密度数据体和裂缝密度数据体,并进一步获得地层水平主应力差异比(DHSR,无量纲)数据体,用于判断井周地应力状态^[26]:

$$DHSR = \frac{4e(1-2v)}{[3g(1-g)-4e](1-v)+4e(1-2v)} \quad (4)$$

式中: e 为裂缝密度,条/m; g 为S波波速与P波波速比的平方,无量纲; v 为泊松比,无量纲。

3.3 三维地质工程建模技术

3.3.1 岩相建模

四川盆地发育致密砂岩、页岩等非常规储层,且纵向上具有箱体结构、厚层页岩/砂岩结构、砂-泥互层结构等,精确的岩相模型是储层地质-工程参数属性预

测的重要基础^[27]。岩相建模依托的基础数据主要包括测井解释数据和阻抗反演数据。首先通过离散测井岩性解释认识垂向岩性分布规律,再基于空间层序格架与阻抗反演体认识岩相的平面分布规律,最后基于地质统计学方法,分层位以单井解释结果为“硬”数据,采用地震阻抗概率图约束方法建立岩相模型。此方法可适用于纵向上分别发育页岩、砂岩、砂-泥岩互层的复杂储层岩相建模(图4)。

3.3.2 裂缝建模

四川盆地由于受到较强的构造作用,断裂及天然

裂缝系统非常发育,可分为中-小尺度天然裂缝和中-大尺度天然裂缝^[28]。针对中-小尺度的天然裂缝,首先基于地震最大似然裂缝属性^[29],对已有的网格进行采样,建立最大似然裂缝属性体三维模型,再以测井解释的裂缝指示曲线为计算数据,以最大似然裂缝属性体为空间约束,建立裂缝概率模型,最后以测井解释的裂缝属性为基础,例如裂缝孔隙度、裂缝渗透率等,以裂缝概率体为空间约束,建立裂缝属性模型(图5a)。针对中-大尺度的天然裂缝,首先基于Unet3D深度学习的方法识别中-大尺度裂缝,在此基础之上,计算蚂蚁体数据,随后提取裂缝片,并结合构造背景验证

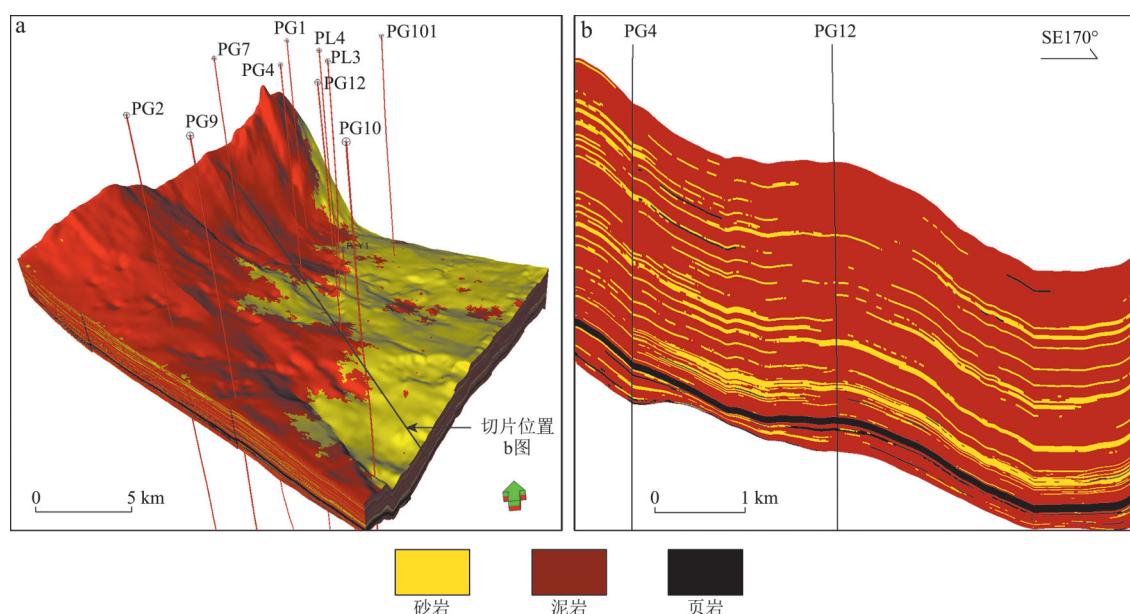


图4 四川盆地普光千佛崖组岩相模型(a)及切片(b)

Fig. 4 Lithofacies model (a) and slice (b) of the Qianfoya Formation, Puguang Gas field, Sichuan Basin

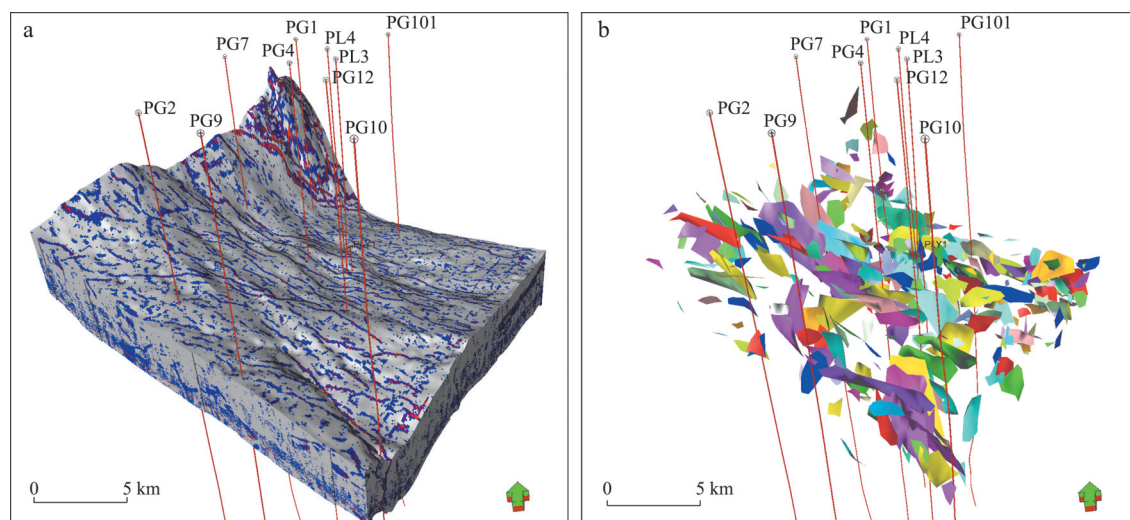


图5 四川盆地普光千佛崖组多尺度天然裂缝建模

Fig. 5 Multi-scale natural fracture model of the Qianfoya Formation, Puguang Gas field, Sichuan Basin

a. 中-小尺度天然裂缝概率模型; b. 中-大尺度天然裂缝DFN模型

所提取数据的准确性,最终采用确定性方法,建立中-大尺度天然裂缝的DFN模型^[29](图5b)。

3.3.3 属性建模

常规油气藏建模技术主要用于建立储层孔隙度模型、渗透率模型、含油气饱和度模型,以便进行储量及产量预测,但是非常规油气藏的开采需要大型压裂技术,属性建模除了要满足储量及产量预测的需求,还要满足人工压裂裂缝模拟预测的需求,因此常规的孔、渗、饱建模不足以满足非常规油气的开采需要,工程参数,特别是储层力学参数(泊松比、杨氏模量、抗拉强度等)、地应力参数(垂向应力、最大水平主应力、最小水平主应力等),也需要进行三维描述,以满足非常规油气的压裂开采需求。孔、渗、饱参数的建模方法往往采用相(岩相、沉积相)控约束,采用序贯高斯

法建立模型。而工程参数除了岩相约束以外,还需要利用井-震深度融合的方法,在空间上以地震叠前数据反演的岩石物理参数作为约束条件,测井数据为计算数据,对工程参数进行三维预测。在此过程中,如果研究区井数较多,工程参数建模可依靠离散网格数据的分布进行计算;如果研究区井数较少,则需要对离散网格数据进行数据分析后再计算,使得计算结果更为合理(图6)。

3.4 一体化水力压裂模拟技术

3.4.1 复杂裂缝扩展模拟

四川盆地非常规气藏普遍经受过多次强构造运动改造,存在构造多变、应力非均质及天然裂缝、层理发育等问题,对水力压裂模拟提出了更高的要求。现有

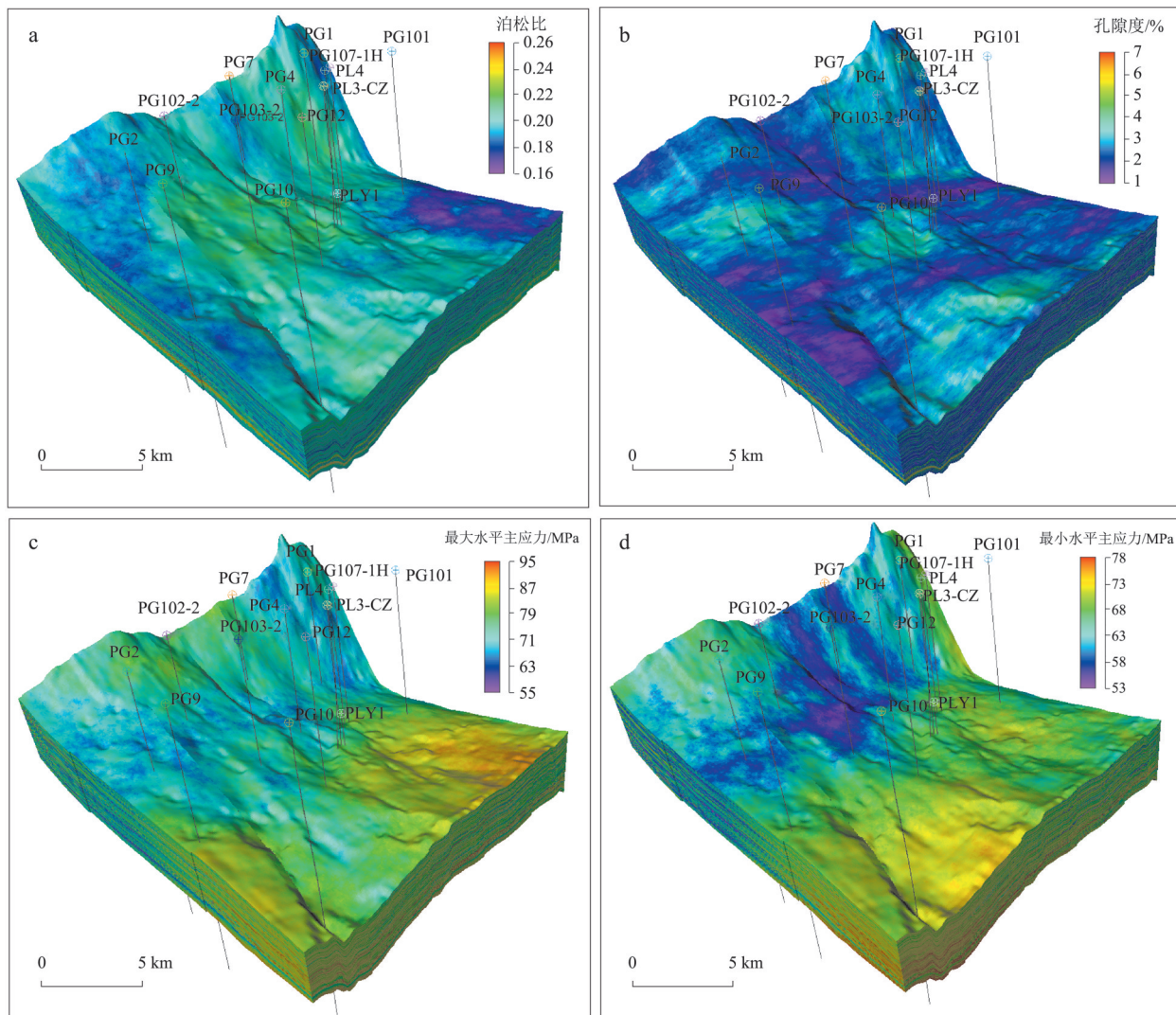


图6 四川盆地普光千佛崖组三维属性模型

Fig. 6 Three-dimension attribute models of the Qianfoya Formation, Puguang Gas field, Sichuan Basin

a. 孔隙度模型; b. 泊松比模型; c. 最大水平主应力模型; d. 最小水平主应力模型

压裂模拟技术通常简化复杂地质特征,弱化非均质性、层理等关键因素的影响,压裂裂缝模拟与实际监测结果相差较大^[30-31]。

针对复杂裂缝扩展模拟问题,考虑复杂地层岩石变形与破裂,耦合水平井筒、缝网液体流动方程,基于非连续介质力学块体离散元法,构建了多场耦合的三维复杂裂缝扩展高效模拟技术^[32-33]。替代传统各向同性岩石本构方程的力学模型,采用横观各向同性表征页岩力学各向异性,通过渗透率等效显式表征页岩密集的层理弱面,创新刻画层理对压裂裂缝形态的影响(图7)。针对压裂模拟中的复杂非均质地表征问题,以地质建模属性(岩石力学、应力场等)及离散裂缝等为约束条件,采用网格映射及球形自适应搜索算法,对水力压裂裂缝数值模拟网格进行前处理,实现地质到压裂网格的剖分、转换与数据传递,以满足三维地质建模网格及属性体下的裂缝扩展模拟需求,将压裂优化设计拓展到三维地质建模。

3.4.2 压裂裂缝调控技术

现场井下射孔成像、分布式光纤监测等结果表明,压裂过程中各簇裂缝存在明显的非均匀扩展。如何提高压裂段各簇裂缝扩展均衡性,提高水力裂缝覆盖率和复杂程度,是压裂优化设计的重要目标。在“井筒-孔眼-裂缝”全耦合流量动态分配模型基础上,引入了暂堵、非均匀射孔等工艺数学表征^[34-35],可评价限流压裂、暂堵等裂缝调控工艺对水平井分段分簇压裂裂缝形态的影响。利用限流射孔及投球暂堵后,各簇裂缝的扩展均衡性得到有效调控,段内压裂裂缝覆盖率及裂缝复杂程度明显提升。图8为单井压裂段的现场实例,多簇压裂裂缝在非均匀应力及天然裂缝诱导扩展方向的影响下出现非均匀扩展现象,裂缝沿井筒一侧方向扩展;通过缝内暂堵,对优势扩展裂缝通道进行封堵,压裂裂缝向井筒另一侧扩展,模拟结果与微地震监测结果一致。

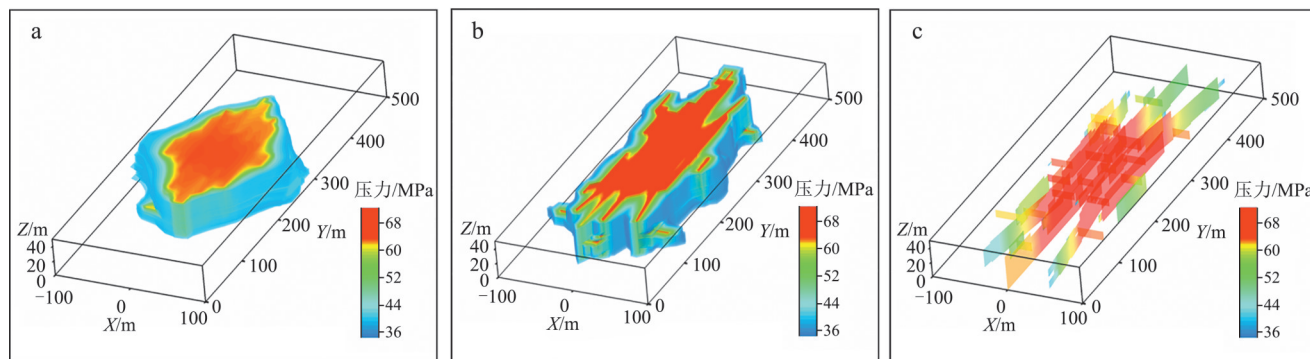


图7 四川盆地考虑层理影响的复杂裂缝扩展模式

Fig. 7 Complex fracture propagation model with bedding effects, Sichuan Basin

a. 层理弱面充分开启; b. 主裂缝+层理弱面部分开启; c. 主裂缝+天然裂缝开启

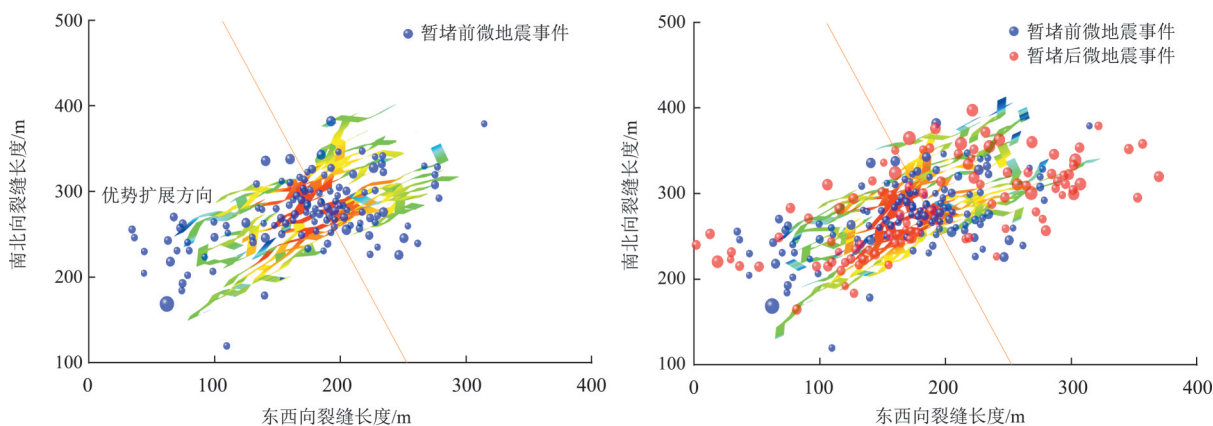


图8 四川盆地林滩场LY3井缝内暂堵对裂缝扩展形态的影响(与微地震监测对比)

Fig. 8 Effect of intra-fracture diversion of fluid on fracture propagation patterns (compared with micro-seismic monitoring results) of Well

LY3 in Lintanchang Block, Sichuan Basin

a. 暂堵前裂缝优先沿井筒一侧扩展; b. 暂堵后裂缝扩展均衡性得到改善

3.5 压裂效果评价技术

压后水力裂缝参数与复杂程度的定量评价对压裂工艺适应性判断及压裂参数进一步优化尤为重要。目前,现有压裂裂缝参数定量评价主要依靠微地震监测等对裂缝空间几何形态进行实时评价,以及利用返排或生产数据进行等效裂缝参数的反演。其中,微地震监测等方法主要评价改造体积,而返排、生产数据反演裂缝参数类方法不具备实时性,无法对单段压裂效果进行评价。施工压力降落数据是压裂施工中的基础数据,Nolte等早期提出的压降分析模型可用来评价裂缝参数,但假设条件为单一水力裂缝,且仅适用于小型测试压裂。目前还没有针对复杂裂缝的压降分析方法。为此,在物质平衡方程中引入次级裂缝滤失项,即在关井后,总注入物质体积等于裂缝体积与主、次裂缝滤失体积之和^[36],那么

$$c_{fm}A_{fm}(ISIP - p_c) = \frac{V_p}{n_c} - 2r_p\sqrt{t_p}C_L(A_{fm} + A_{fn})g_0 \quad (5)$$

$$ISIP - p_w(\Delta t) = p_1^*G(\Delta t_D, \alpha) \quad (6)$$

$$p_1^* = \frac{\pi r_p\sqrt{t_p}C_L(A_{fm} + A_{fn})}{2C_{fm}A_{fm}} \quad (7)$$

式中: c_{fm} 为水力裂缝的柔度, m/MPa; A_{fm} 和 A_{fn} 为水力裂缝和天然裂缝的面积, m^2 ; $ISIP$ 为瞬时关井压力, MPa; p_c 为裂缝闭合压力或地层最小主应力, MPa; V_p 为该段裂缝总泵注液体体积, m^3 ; n_c 为压裂段内射孔簇数, 无量纲; r_p 为可滤失裂缝面积与总裂缝面积的比例, 无量纲; t_p 为泵注时间, min; C_L 为滤失系数, 无量纲; g_0 为常数, 无量纲; p_w 为井底压力, MPa; Δt 为关井后的时间, min; $t_D = t/t_p$, 无量纲; p_1^* 为特征线段斜率, 无量纲; $G(\Delta t_D, \alpha)$ 为 G 函数; α 为裂缝面积指数, 无量纲。

通过耦合求解主、次裂缝滤失作用下的停泵压降速率特征函数,实现压后主裂缝、次裂缝(天然裂缝)参数与复杂程度参数定量评价。以PL4井为例,该井主裂缝半长 93 ~ 175 m,天然裂缝与主裂缝开启面积比达到 17.5 ~ 38.6,水力裂缝沟通大量天然裂缝,压裂改造过程中形成了复杂缝网(图9)。

4 地质-工程一体化应用案例

4.1 普光千佛崖组陆相致密砂岩气探区

四川盆地侏罗系千佛崖组致密砂岩气藏为普光地区一套陆相有利成藏层系,经初步评价川东断褶带黄

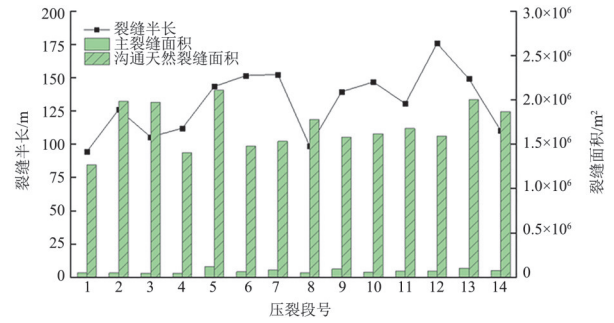


图9 四川盆地千佛崖组PL4井复杂人工裂缝参数反演结果

Fig. 9 Inversion results of complex artificial fracture parameters in Well PL4, Qianfoya Formation, Sichuan Basin

金口构造普光东向斜千一段致密砂岩为有利甜点区(厚度 30 m),岩性以细砂岩、泥质粉砂岩为主,储层埋深平均 3 300 m,测井评价平均孔隙度 5.4 %,含气量 1.5 m^3/t ,含气饱和度 43.2 %,脆性矿物平均含量 46.5 %,预测地层压力系数 1.31。岩石力学特征中杨氏模量为 38.3 GPa,泊松比 0.23。前期针对普光须家河组致密砂岩气部署的PL2井采用常规压裂设计改造工艺模式,压后产气量 2.8 $\times 10^4 m^3/d$,未达到预期效果。针对普光千一段致密砂岩储层河道展布和天然裂缝分布初步评价结果部署了PL3井(垂深 3 282 m),以求探索千佛崖组储层的含气情况。

通过对PL3井周地质-工程甜点参数综合分析表明,地质-工程甜点平面分布差异性大,PL3井位于相对最优的地质-工程甜点区,河道砂体内天然裂缝相对较为发育但井眼轨迹穿行于天然裂缝的上部位置。结合压裂裂缝扩展模拟,明确不同水平井段物性特征和施工参数等条件下的裂缝扩展规律,通过优化布缝、强化优质甜点改造规模,实现甜点最大程度改造。基于PL3井压后分析表明:①储层基质超低孔/渗,天然裂缝发育为高产的重要因素;②压裂改造形成了复杂网状裂缝体系;③压裂施工参数排量、液量与加砂量还有进一步优化空间。PL3井压后测试产气量达到 13.7 $\times 10^4 m^3/d$,评价该层组资源量 1 234 $\times 10^8 m^3$ 。

基于PL3井压裂改造特征,针对PL3井区进行了针对性的实验测试、测井、地球物理和地质建模等综合研究。根据测井连井剖面来看,致密砂岩沿南北方向连续展布(图10),但砂体厚度与内部泥质、钙质夹层位置变化大。东西方向砂体厚度变化大,多数砂体向西厚度明显减薄,各单砂体呈透镜状,认为南北向是主河道方向。

结合测井解释与地震数据,进行目标区域的地球物理解释,解释结果显示千一段致密砂岩储层厚度、含

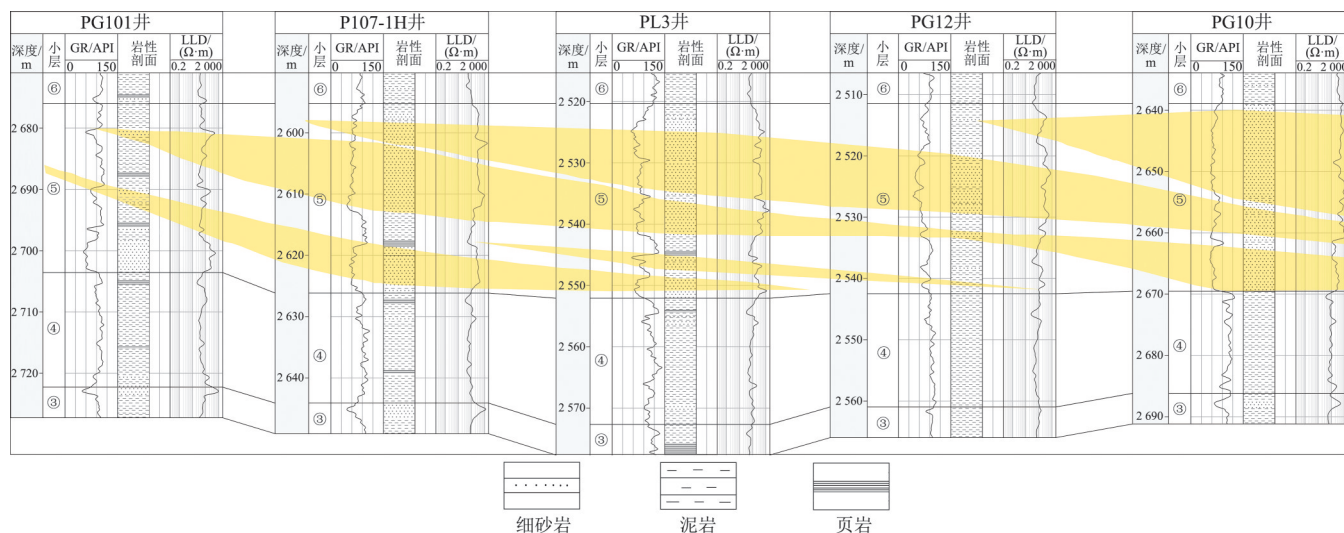


图10 四川盆地千一段致密砂岩气藏南北向连井剖面

Fig. 10 NS-trending cross-well section showing the tight gas reservoir in the Qian 1 member, Sichuan Basin

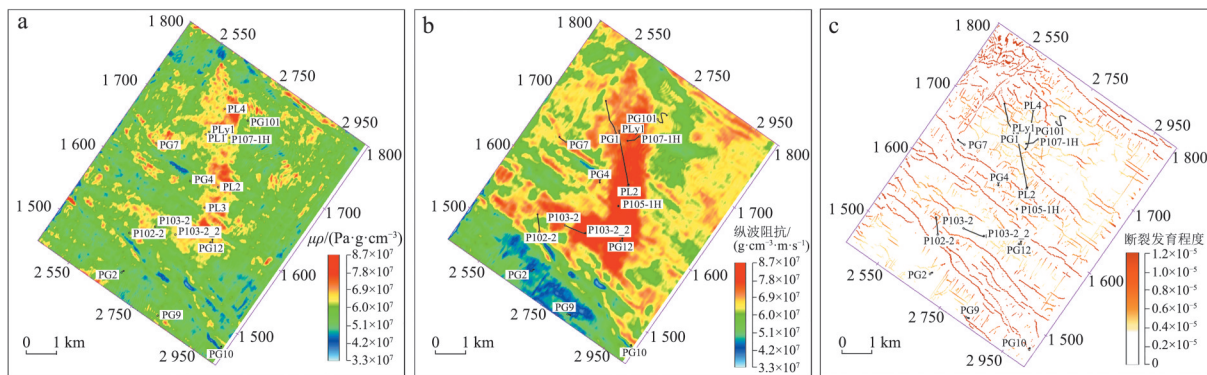


图11 四川盆地普光千佛崖组储层(a)、含气性(b)及裂缝(c)地震预测结果

Fig. 11 Seismic prediction results of reservoirs, gas-bearing properties and fractures of the Qianfoya Formation, Puguang Gas field, Sichuan Basin

气性、天然裂缝分布以及岩石力学特征等横向差异性大,其中河道展布、含气性与天然裂缝发育程度如图11所示。根据地球物理解释结果,PL3井眼轨迹穿行区域整体含气性好,天然裂缝发育,与压裂改造和后续试气显示基本一致,但B靶点靠近河道边界区域。基于测井、地球物理综合解释结果部署了PL4井,PL4井位于PL3井北部河道砂体的中部位置,含气性好,天然裂缝较发育。PL4井钻井过程中钻井液漏失情况与地球物理预测的天然裂缝发育特征具有很好的一致性,表明地球物理预测的天然裂缝分布具有较高的可靠性。

利用测井、地球物理解释结果构建了三维地质模型(图4—图6),综合PL4井钻遇储层的含气性、天然裂缝、砂体展布以及地质—工程甜点参数特征,设计分段14段56簇射孔,具体的分段分簇如图12所示。综合储层特征,明确以“沟通天然裂缝、扩大储层改造体

积”为设计思路,PL4井采用“多段少簇+一体化变粘滑溜水+多粒径支撑剂+投球暂堵”压裂工艺。单个压裂段综合考虑储层岩性、天然裂缝分布、地应力以及穿行位置,结合PL3井压裂施工情况,采取“一段一策”的方式进行相关的施工参数优化并制定差异化的泵注程序,具体的原则主要包括:①压裂初期和暂堵后采用交联滑溜水扩缝高+造主缝或快速突破泥岩夹层;②压裂中期投球暂堵,增加不同射孔簇的裂缝扩展的均匀程度;③泥质含量高的压裂段略降低综合砂液比,压裂前期尽可能提高排量突破泥岩,致密砂岩段尽可能长段塞式加砂,提升综合砂/液比;④近井筒周围存在裂缝带和无裂缝带的压裂段进行差异化设计,近井筒天然裂缝发育段增加70/140目支撑剂用量以暂堵近井筒天然裂缝和打磨裂缝壁面,同时尽可能提高排量与规模、略降低整体加砂强度;⑤加强近井筒地带的主缝支撑效果,采用30/50目支撑剂支撑近井筒主

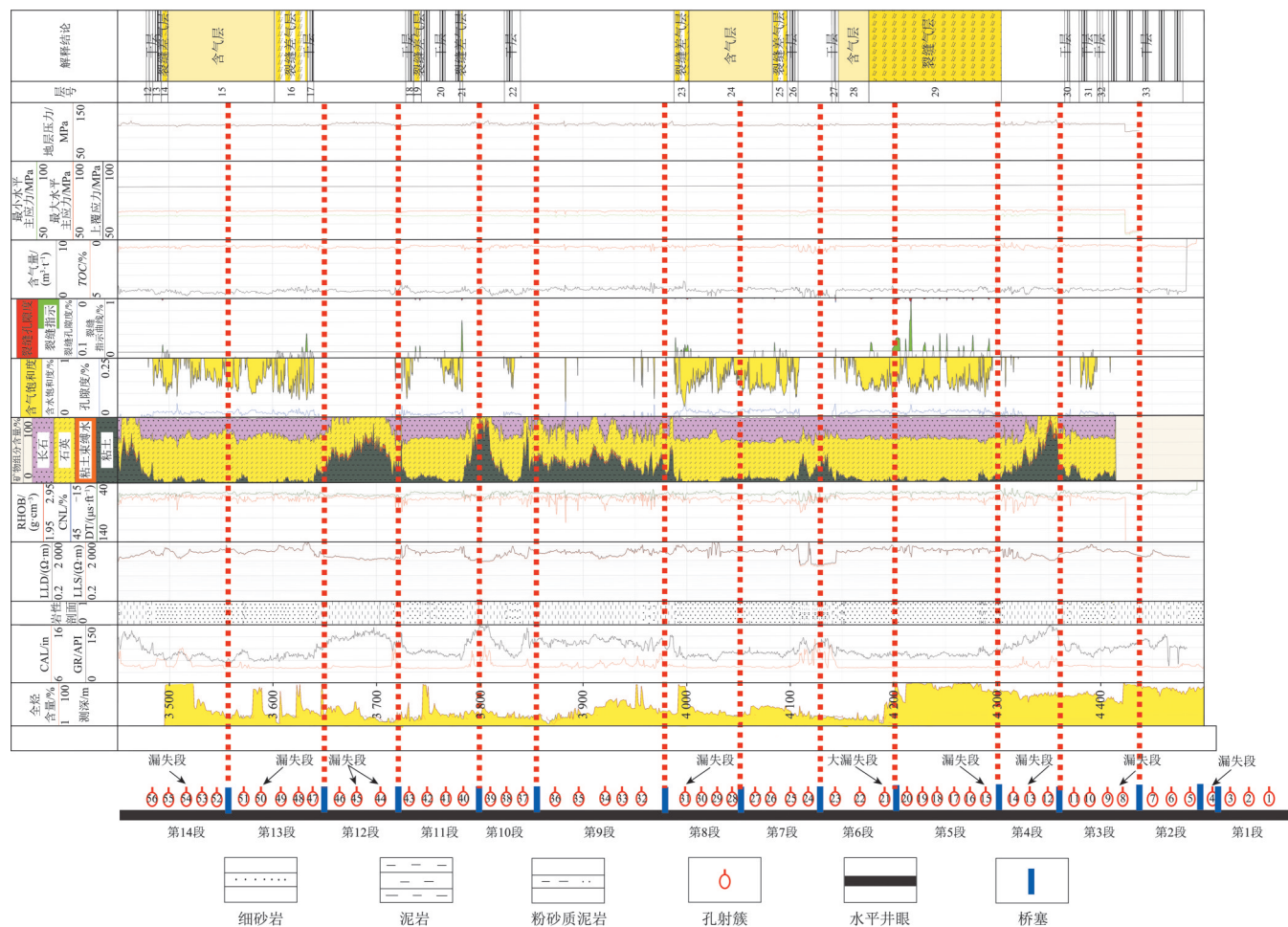


图12 四川盆地普光千佛崖组PL4井地质-工程一体化压裂分段、分簇

Fig. 12 Stage/cluster division based on integrated geological-reservoir engineering study for Well PL4 in the Qianfoya Formation, Puguang Gas field, Sichuan Basin

裂缝。与PL3井相比,进一步增加了用液强度、加砂强度、施工排量,通过低中高粘滑溜水交替注入尽可能增加裂缝复杂程度。

PL4井施工排量主体在16~18.5 m³/min,压裂施工总液量30 559.4 m³,用液强度28 m³/m;累计注入砂量1 548.2 m³,加砂强度1.42 m³/m。压后评价认为压裂改造形成了大规模复杂裂缝,与PL3井相比,单段压裂改造体积提升62%,压裂裂缝半长提升45%。PL4井压后日产量达到33.8×10⁴ m³,大幅度提高了普光陆相千佛崖组致密砂岩气的单井产能,实现了该区的勘探突破。

4.2 林滩场五峰组-龙马溪组深层页岩气探区

林滩场背斜构造位于四川盆地边缘齐岳山推覆构造断裂发育带,目的层位为五峰组-龙马溪组页岩,该页岩横向展布稳定、黑色且富有机质、厚度80~106 m,地层压力系数1.2,应力状态复杂。前期探井LY1井位于构造高部位,水平段长1 587 m,垂深3 190 m,开展23

段68簇分段压裂,平均段长69 m、段间距36 m、簇间距17.8 m。压裂施工过程中出现施工压力高、加砂难度大、返排困难的现象(用液强度27.2 m³/m,加砂强度0.88 m³/m)。压后初期测试产量3.95×10⁴ m³/d,未达到工业气流标准。LY1井压后分析发现其水力裂缝半长62~142 m、平均80.5 m,井周天然裂缝发育,主裂缝沟通大量天然裂缝,造成压裂液大量滤失、压裂液造缝效率低。同时,水平井眼轨迹与最大水平主应力方向夹角54°,裂缝近井弯曲摩擦阻高,造成加砂难度大。经评价,LY1井裂缝平均导流能力1.0 D·cm,单井控制半径小于70 m,单井控制储量0.65×10⁸ m³,预测后期产量平稳但低产、改造效果差。

新井LY3井位于南端构造核部,地层倾角0°~20°,水平段长1 500 m,垂深4 100 m。为了避免井轨迹对压裂施工及裂缝参数的影响,水平段方位角与最大主应力夹角基本为90°,且五峰组-龙马溪组优质储层钻遇率100%。测井评价目标层段TOC平均为5.3%、孔隙

度7.8%、渗透率 $0.035 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,含气量 $3.86 \text{ m}^3/\text{t}$ 。脆性矿物平均为71.3%,其中硅质58.5%、钙质12.9%。岩石力学特征中杨氏模量为34.2 GPa,泊松比0.23,力学脆性指数0.51,气测显示全烃含量平均16.16%,略低于LY1井。目标层位为走滑断层应力状态($\sigma_{\text{H}} > \sigma_{\text{V}} > \sigma_{\text{h}}$, σ_{H} 最大水平主应力,MPa; σ_{V} 上覆应力,MPa; σ_{h} 最小水平主应力,MPa),水平应力差异较大,为15.2~19.5 MPa,不利于复杂人工裂缝的生成。

通过开展本井地震资料、区域构造等地球物理及地质资料的处理与解释工作,明确了储层天然裂缝分布特征。图13为LY3井过井地震数据和最大似然体叠合剖面图,水平井段极大似然属性值偏低,表明整体天然裂缝弱发育,但存在5个潜在裂缝发育区,其中靠近B靶点的裂缝带发育可能性最大。断裂走向基本为西南-东北方向,与最大水平主应力方向基本一致。

通过开展导眼井段和水平井段测井数据分析,明确不同小层的纵向物性参数、地应力、岩石力学参数等变化,优选地质甜点与工程甜点。通过加强压前地震裂缝预测以及地应力大小等工程参数评价,精细认识水平段地质特征、天然裂缝及储层非均质性,明确以“提高裂缝扩展均衡性、增加泄气面积与强化裂缝有效支撑”为设计思路,提出“多段多簇细分密切割+一体化变粘滑溜水+变排量+多粒径组合强加砂+堵球、堵剂双暂堵”压裂工艺模式。结合压裂裂缝扩展模拟技术,预测不同分段分簇及泵注程序下的水力裂缝空间展布及裂缝复杂形态,优化段簇划分及泵注参数,提出了不同类型压裂段的差异化压裂设计。例如,压裂模拟结果表明天然裂缝发育段压裂液滤失增大,改造体积变小,同时簇间裂缝合并、非均匀扩展现象严重,会造成段内压裂裂缝覆盖率低、改造效果差。因此,针对天然裂缝发育段,通过降低压裂簇数、增加簇间距,可以减少簇

间裂缝合并扩展、降低非均匀扩展程度,同时配合投球暂堵,压裂裂缝复杂性及各簇裂缝扩展均匀性大幅度提高。另外,针对天然裂缝段增加140/200目微粒直径支撑剂用量,实现压裂裂缝全支撑。

LY3井共设计28段130簇(单段3~6簇),平均段间距21.3 m、簇间距7.8 m,施工用液强度 $34 \text{ m}^3/\text{m}$,加砂强度 $2.43 \text{ m}^3/\text{m}$,综合砂比7.16%,最高单段综合砂/液比8.68%。压后测试产量 $17.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,与邻井LY1井相比产量提高4倍,实现赤水深层常压页岩气勘探突破。微地震监测结果显示天然裂缝发育段与地震预测的裂缝分布具有高度一致性,产气剖面也显示天然裂缝发育区与每米产气较高区域具有一致性(图14)。

5 讨论

1) 本次主要是从技术层面探讨复杂非常规气藏探井地质-工程一体化压裂效果,开展地质与测井、地球物理、工程专业技术深度融合研究,目标是获得高产而实现勘探突破,没有充分考虑压裂实施过程中经济成本因素。下一步将探索不同区块非常规气藏探井压裂技术和经济一体化模型,建立四川盆地不同类型地质条件下的探井压裂学习曲线,降低勘探阶段压裂成本,同时为开发提供决策依据。

2) 复杂非常规气藏数据共享瓶颈直接影响地质-工程一体化压裂效果和效益。北美非常规油气成功开发的关键因素是水平井体积压裂技术突破、数据共享和建模、井工厂施工作业模式。目前四川盆地非常规气藏勘探开发活跃,探井的地质和工程基础数据和经济参数分散在不同企业单位,相邻区域压裂数据和经验难以共享和借鉴,有必要建立盆地级非常规勘探开发数据库。

3) 测井资料解释可实现近井储层物性及裂缝发

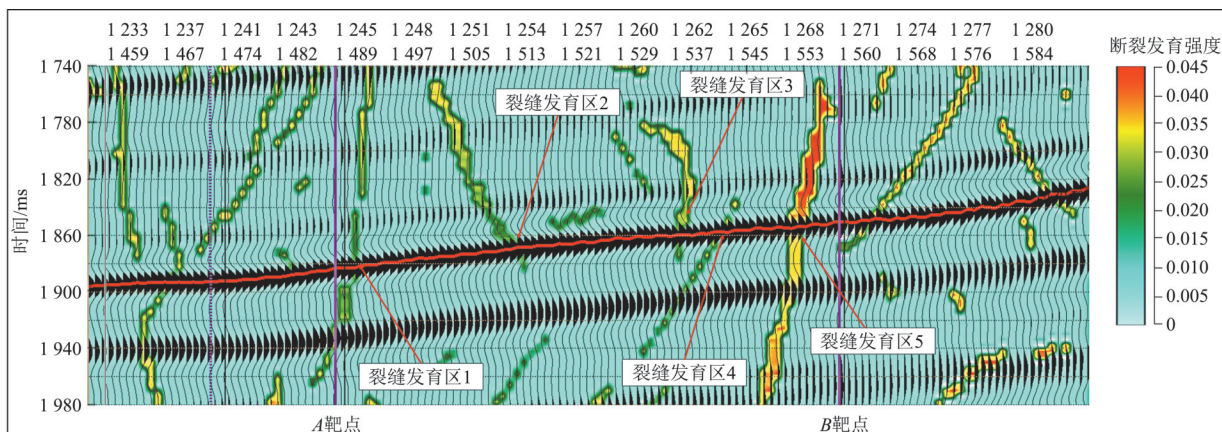


图13 四川盆地林滩场LY3井过井地震数据和极大似然体叠合剖面

Fig. 13 Well-tie seismic section with likelihood volume overlaid for Well LY3 in the Lintanchang Block, Sichuan Basin

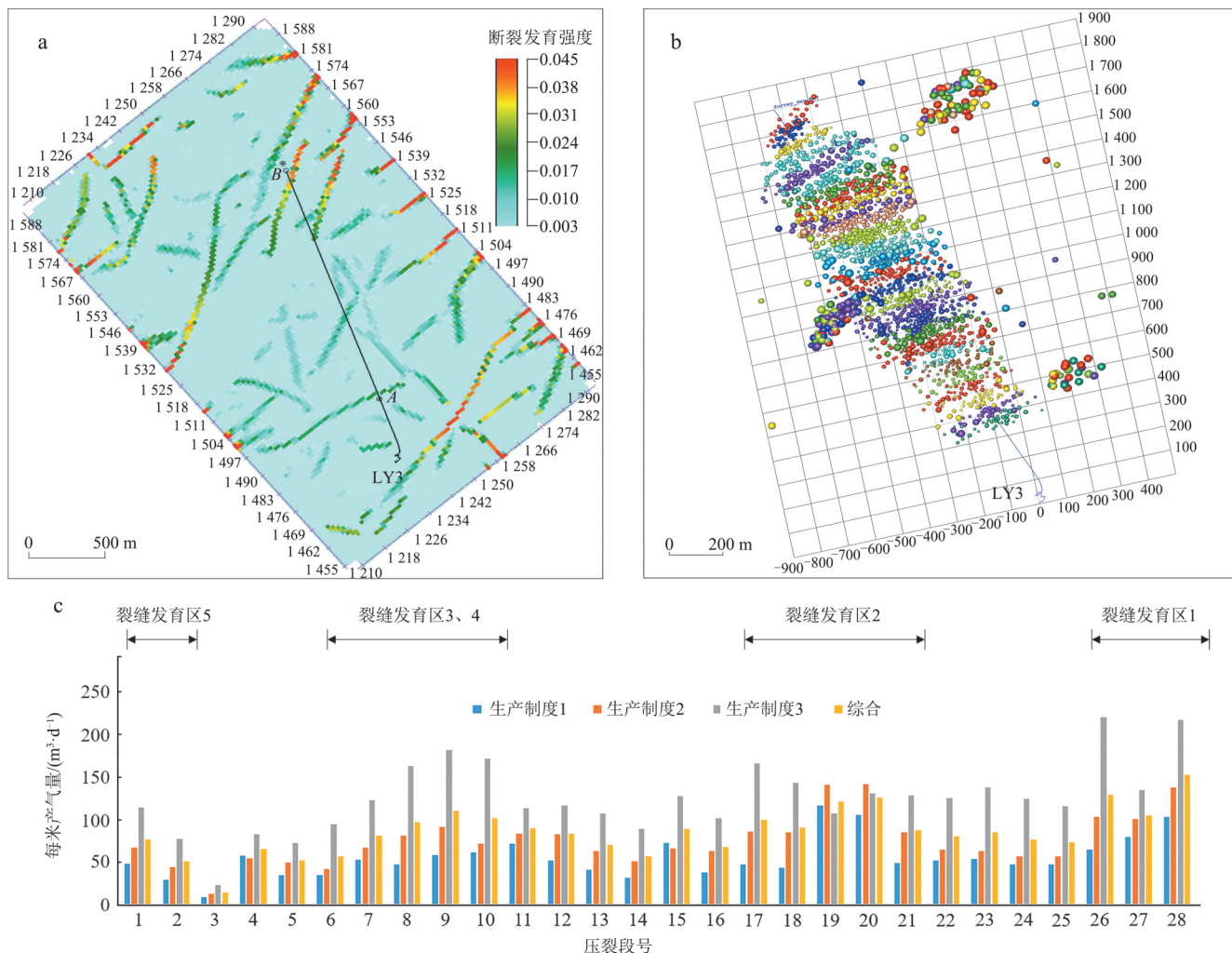


图14 四川盆地LY3井压后效果监测结果及对比

Fig. 14 Monitoring results of fracturing in Well LY3, Lintanchang Block, Sichuan Basin

a. 最大似然属性; b. 微地震监测结果; c. 产液剖面监测结果

育程度等参数精确表征,但难以推测井间储层参数。地震数据解释技术,尤其是叠后、叠前地震属性提取和反演为相对较薄的优质页岩层、砂-泥薄互层的储层参数预测以及小尺度的裂缝预测提供了可能性,但现有地震解释手段对于岩相、裂缝等预测精度依然不够,难以对压裂优化起到有效的指导作用。同时,三维地质力学建模方法目前尚不成熟,需要求解的参数较多、求解过程较为复杂,预测精度较低。基于已有测井解释与地震解释数据构建大数据样本知识库,优化储层岩相与断裂参数特征表示方法,利用人工智能技术训练复杂网络模型,有望提高三维地震预测储层参数的精度。

4) 高精度压裂和布缝优化的理想目标是聚焦甜点、实现压裂段数少、精、准,而压裂模拟器是实现压裂目标优化的核心手段。由于涉及到强流固耦合、动边界等诸多问题,高精度全耦合求解困难、收敛性差且计

算量巨大,模拟效率与精度无法兼得。攻关压裂模拟高效算法是解决这一矛盾的关键。为此,尚需要持续攻关压裂模拟高效算法,完善压裂优化建模、数模模块,同时可引入特色算法、人工智能与机器学习,构建智能压裂优化技术,突破算力、算时限制,进一步助力压裂优化由单井向区块整体发展。

5) 地质-工程一体化压裂技术的运用,是以储层地质认识指导压裂实践,同时通过压裂实践加深对储层的再认识的过程,即是地质认识与工程实践相辅相成、滚动推进的周期性过程。新区勘探早期井资料较少,导致储层认识不足,压裂设计与现场实践效果存在差异。压后评价可以对储层特征及参数进行再认识、对压裂工艺适应性进行再评价。通过一体化压裂技术持续实施,不断积累地质、工程数据,结合人工智能加强地质认识、修正地质模型,获取学习曲线,才能为后续压裂井工艺模式的精细调整与科学优化提供保障。

6 结论与认识

1) 四川盆地普光千佛崖组致密气及林滩场深层页岩气等探区地质-工程一体化压裂实践表明,不同地质条件、不同气藏类型压裂优化理念存在一定差异,无法照搬一套思路。对于致密砂岩气储层,应加强对河道砂体展布及天然裂缝预测,强化优质甜点改造、强化天然裂缝沟通,采用“多段少簇+一体化变粘滑溜水+多粒径支撑剂+投球暂堵”模式;对于页岩气储层,应加强储层应力、天然裂缝、含气性等参数分布预测,通过段簇及泵注参数优化,配合暂堵工艺,提高裂缝形态复杂性与扩展均衡性,采用“多段多簇密切割+一体化变粘滑溜水+变排量+多粒径组合强加砂+堵球、堵剂双暂堵”模式,增加有效改造体积,提高单井产能。

2) 通过在四川盆地复杂致密气和页岩气探区百余口探井或评价井压裂实践,开展地质、测井、地震、工程等多专业联合研究,定量表征非常规储层空间展布、物性、含气性、岩石力学及矿物含量、地层压力、应力场、天然裂缝等关键参数,建立了区域气藏三维地质-工程模型,利用模型进行压裂裂缝空间扩展模拟,优化射孔、暂堵、压裂液、支撑剂、排量等工艺参数,及时跟踪分析和调整必要的现场施工参数,从而增加有效改造体积提高单井产能,探索并形成了地质-工程一体化压裂技术体系及方法流程,大幅度降低了工艺探索周期,提高了探井压裂成功率,为类似油气藏地质-工程一体化勘探与开发提供借鉴。

参 考 文 献

- [1] Gupta J K, Zlelonka M G, Albert R A, et al. Integrated methodology for optimizing development of unconventional gas resources [C]//SPE. SPE hydraulic fracturing technology conference. Texas: SPE, 2012.
- [2] 吴奇,梁兴,鲜成钢,等. 地质-工程一体化高效开发中国南海相页岩气[J]. 中国石油勘探,2015,20(4):1-23.
Wu Qi, Liang Xing, Xian Chenggang, et al. Geoscience-to-production integration ensures effective and efficient South China marine shale gas development[J]. China Petroleum Exploration, 2014,19(6):14-23.
- [3] 孙焕泉,周德华,蔡勋育,等. 中国石化页岩气发展现状与趋势[J]. 中国石油勘探,2020,25(2):14-26.
Sun Huanquan, Zhou Dehua, Cai Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):14-26.
- [4] 谢建勇,崔新疆,李文波,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. 中国石油勘探,2022,27(1):99-110.
Xie Jianyong, Cui Xinjiang, Li Wenbo, et al. Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):99-110.
- [5] 唐磊,王建峰,曹敬华,等. 塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索[J]. 油气藏评价与开发,2021,11(3):329-339.
Tang Lei, Wang Jianfeng, Cao Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021,11(3):329-339.
- [6] 刘乃震,何凯,叶成林. 地质工程一体化在苏里格致密气藏开发中的应用[J]. 中国石油勘探,2017,22(1):53-60.
Liu Naizhen, He Kai, Ye Chenglin. Application of geology engineering integration in the development of tight gas reservoir in Sulige Gasfield [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 53-60.
- [7] 鲜成钢. 页岩气地质工程一体化建模及数值模拟:现状、挑战和机遇[J]. 石油科技论坛,2018,37(5):24-34.
Xian Chenggang. Shale gas geological engineering integrated modeling and numerical simulation: Present conditions, challenges and opportunities [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2018,37(5):24-34.
- [8] 梁兴,单长安,蒋佩,等. 浅层页岩气井全生命周期地质工程一体化应用[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2021,43(5):1-18.
Liang Xing, Shan Changan, Jiang Pei, et al. Geology and engineering integration application in the whole life cycle of shallow shale gas wells [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021,43(5):1-18.
- [9] 吴奇,胡文瑞,李岫. 地质工程一体化在复杂油气藏效益勘探开发中存在的“异化”现象及思考建议[J]. 中国石油勘探,2018,23(2):1-5.
Wu Qi, Hu Wenrui, Li Xun. The phenomenon of alienation of geology-engineering integration in exploration and development of complicated oil and gas reservoirs, and related thoughts and suggestions [J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(2):1-5.
- [10] 戴金星,倪云燕,刘全有,等. 四川超级气盆地[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(6):1081-1088.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Liu Quanyou, et al. Sichuan super gas basin in southwest China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(6):1081-1088.
- [11] 张道伟. 四川盆地未来十年天然气工业发展展望[J]. 天然气工业,2021,41(8):34-45.
Zhang Daowei. Development prospect of natural gas industry in the Sichuan Basin in the next decade [J]. Natural Gas Industry, 2021,41(8):34-45.
- [12] 郭旭升. 南海海相页岩气“二元富集”规律—四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报,2014,88(7):1209-1218.
Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in Southern China: Understanding from the Longmaxi formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area [J]. Acta Geologica Sinica, 2014,88(7):1209-1218.
- [13] 胡东风,王良军,黄仁春,等. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业,2019,39(6):13-21.
Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Huang Renchun, et al. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019,39(6):13-21.
- [14] 王濡岳,胡宗全,龙胜祥,等. 四川盆地上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质,2022,43(2):353-364.
Wang Ruyue, Hu Zongquan, Long Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician

- Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 353-364.
- [15] 杨克明, 朱宏权, 叶军. 川西致密砂岩气藏地质特征[M]. 科学出版社, 2012.
- Yang Keming, Zhu Hongquan, Ye Jun. Geological characteristics of tight sandstone gas reservoirs in western Sichuan[M]. Science Press, 2012.
- [16] 郑志红, 李登华, 白森舒, 等. 四川盆地天然气资源潜力[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(3): 12-20.
- Zheng Zhihong, Li Denghua, Bai Senshu, et al. Resource potential of natural gas in the Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(3): 12-20.
- [17] 张道伟, 杨雨. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 1-11.
- Zhang Daowei, Yang Yu. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 1-11.
- [18] 胡文瑞. 地质工程一体化是实现复杂油气藏效益勘探开发的必由之路[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 1-5.
- Hu Wenrui. Geology-engineering integration-a necessary way to realize profitable exploration and development of complex reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 1-5.
- [19] 谢军, 张浩森, 余朝毅, 等. 地质工程一体化在长宁国家级页岩气示范区中的实践[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 8.
- Xie Jun, Zhang Haosen, Yu Chaoyi, et al. Practice of geology-engineering integration in Changning state shale gas demonstration area[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(1): 21-28.
- [20] 南泽宇, 李军, 刘志远, 等. 基于数值模拟的双感应测井裂缝参数定量评价方法[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 696-701.
- Nan Zeyu, Li Jun, Liu Zhiyuan, et al. Fracture evaluation method of dual induction log based on numerical simulation[J]. Progress in Geophysics(in Chinese), 2017, 32(2): 696-701.
- [21] Nan Zeyu, Tan Maojin, Li Jun, et al. Numerical simulation, response analysis, and physical experiment of induction logging in an inclined fractured formation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1-11.
- [22] Li Jun, Wu Qingzhao, Jin Wujun, et al. Logging evaluation of free-gas saturation and volume content in Wufeng-Longmaxi organic-rich shales in the Upper Yangtze Platform, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 100: 530-539.
- [23] 李军, 路菁, 李争, 等. 页岩气储层“四孔隙”模型建立及测井定量表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 266-271.
- Li Jun, Lu Jing, Li Zheng, et al. Four-pore modeling and its quantitative logging description of shale gas reservoir[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 266-271.
- [24] 李军, 武清钊, 金武军, 路菁, 页岩气储层总孔隙度与有效孔隙度测量及测井评价—以四川盆地龙马溪组页岩气储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 602-609.
- Li Jun, Wu Qingzhao, Lu Jing, et al. Measurement and logging evaluation of total porosity and effective porosity of shale gas reservoirs: A case from the Silurian Longmaxi Formation shale in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 602-609.
- [25] Rickman R, Mullen M J, Petre J E, Grieser W V. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale[C]//SPE. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado: SPE, 2008.
- [26] Du B, Zhang G, Zhang J, et al. The application of tight gas reservoir stress prediction through pre-stack azimuthal AVO inversion[C]//SEG. SEG Nanjing 2020 International Geophysical Conference. Nanjing: SEG, 2020.
- [27] 商晓飞, 李蒙, 刘君龙, 等. 基于源-汇系统的砂体分布预测与三维地质建模——以四川盆地川西坳陷新场构造带须二段为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(1): 62-72.
- Shang Xiaofei, Li Meng, Liu Junlong, et al. Source-sink system based sand body distribution prediction and 3D geological modeling: A case study of the 2nd Member of Xujiahe Formation in Xinchang structural belt of Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 62-72.
- [28] 商晓飞, 龙胜祥, 段太忠. 页岩气藏裂缝表征与建模技术应用现状及发展趋势[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(2): 18.
- Shang Xiaofei, Long Shengxiang, Duan Taizhong. Current situation and development trend of fracture characterization and modeling techniques in shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(2): 215-232.
- [29] 李蒙, 商晓飞, 赵华伟, 等. 基于likelihood地震属性的致密气藏断裂预测——以四川盆地川西坳陷新场地区须二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(6): 1299-130.
- Li Meng, Shang Xiaofei, Zhao Huawei, et al. Prediction of fractures in tight gas reservoirs based on likelihood attribute—A case study of the 2nd member of Xujiahe Formation in Xinchang area, Western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1299-1309.
- [30] 金衍, 程万, 陈勉. 页岩气储层压裂数值模拟技术研究进展[J]. 力学与实践, 2016, 38(1): 1-9.
- Jin Yan, Cheng Wan, Chen Mian. A review of numerical simulation of hydro-fracking in shale gas reservoir[J]. Mechanics in Engineering, 2016, 38(1): 1-9.
- [31] 赵金洲, 任岚, 沈骋, 等. 页岩气储层缝网压裂理论与技术研究新进展[J]. 天然气工业, 2018, 38(3): 1-14.
- Zhao Jinzhou, Ren Lan, Shen Cheng, et al. Latest research progresses in network fracturing theories and technologies for shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(3): 1-14.
- [32] 周彤, 王海波, 李凤霞, 等. 层理发育的页岩气储集层压裂裂缝扩展模拟[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1039-1051.
- Zhou Tong, Wang Haibo, Li Fengxia, et al. Numerical simulation of hydraulic fracture propagation in laminated shale reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1039-1051.
- [33] Zou Y, Ma X, Zhou T, et al. Hydraulic fracture growth in a layered formation based on fracturing experiments and discrete element modeling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50: 2381-2395.
- [34] 周彤, 陈铭, 张士诚, 等. 非均匀应力场影响下的裂缝扩展模拟及投球暂堵优化[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 82-88.
- Zhou Tong, Chen Ming, Zhang Shicheng, et al. Simulation of fracture propagation and optimization of ball-sealer in-stage diversion under the effect of heterogeneous stress field in a horizontal well[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 82-91.
- [35] 周彤, 张士诚, 陈铭, 等. 水平井多簇压裂裂缝的竞争扩展与控制[J]. 中国科学(技术科学), 2019, 49(4): 469-478.
- Zhou Tong, Zhang Shicheng, Chen Ming, et al. Competitive propagation of multi-fractures and their control on multi-clustered fracturing of horizontal wells[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(4): 469-478.
- [36] 周彤, 苏建政, 李凤霞, 等. 基于停泵压力降落曲线分析的压后裂缝参数反演[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(11): 1646-1654.
- Zhou Tong, Su Jianzheng, Li Fengxia, et al. An approach to estimate hydraulic fracture parameters with the pressure fall off data of main treatment[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(11): 1646-1654.