

引用格式:王浩宇,熊亮,史洪亮,等.威荣深层页岩气田开发水平井测试选段技术研究[J].油气藏评价与开发,2021,11(1):86-94.

Wang Haoyu, Xiong Liang, Shi Hongliang, et al. Testing and selection techniques of horizontal wells in Weirong Shale Gas Field[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 86-94.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.01.012

威荣深层页岩气田开发水平井测试选段技术研究

王浩宇,熊亮,史洪亮,董晓霞,魏力民,简万洪

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:国内外成功开发的经验表明,压裂改造是实现页岩气开发的重要步骤,而测试选段是压裂改造前期工作中最为关键的一步,选段好坏决定着压裂改造的效果。以威荣页岩气田平台井为研究对象,根据前期评价井和后期开发井基础资料的特征,结合测试选段原则,对后期开发井的选段思路进行深化,并从轨迹、地质、工程、裂缝预测四大方面对开发井资料进行合理利用,形成以轨迹穿行评价、地质参数评价、工程参数评价、裂缝预测、综合分段“五步法”的页岩气水平井地质—工程一体化测试选段技术。使用该技术开发井的测试无阻流量较前期评价井提高1~2倍,节约40%方案时间。现场试验表明,该技术对提高深层页岩气的效益开发具有一定的借鉴。

关键词:威荣页岩气田;测试选段;水平井;效益开发;非常规

中图分类号:TE37

文献标识码:A

Testing and selection techniques of horizontal wells in Weirong Shale Gas Field

Wang Haoyu, Xiong Liang, Shi Hongliang, Dong Xiaoxia, Wei Limin, Jian Wanhong

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Southwest China Oil and Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The successful development experience at home and abroad shows that fracturing is an important step to realize shale gas development, and testing selection is the most critical step in the preliminary work of fracturing. The quality of the selection determines the effect of fracturing. Taking Weirong Shale Gas Field platform wells as the research object, according to the characteristics of the basic data of the early evaluation wells and the later development wells, and combined with the principle of testing selection, the later development well selection ideas are deepened. And the development well data is rationally utilized from four aspects, which are the trajectory, geology, engineering and fracture prediction, forming a geological-engineering integration technology of shale gas horizontal well testing selection in “five steps” of trajectory evaluation, geological parameter evaluation, engineering parameter evaluation, fracture prediction, and comprehensive segmentation. The test open flow rate of development wells obtained by this technology is increased by about 1~2 times compared with the previous evaluation wells, saving 40% of the project time. Field tests show that this technology has certain guiding significance for improving the beneficial development of deep shale gas.

Key words: Weirong Shale Gas Field, test section selection, horizontal well, benefit development, unconventional

由于页岩储层的特殊性,页岩气只能通过压裂改造才可能获得产能,而测试选段是页岩储层压裂改造前期工作中最为关键的一步,一般是在水平井完钻、测录井等资料出来后,讨论具体的测试选段方

案,即确定水平段重点压裂施工的层段。要准确了解目的层的真实情况,评价参数的获取是测试选段的关键环节^[1-4]。前期评价井中测试选段主要依据测井解释、实验分析所获取的储层静态参数、录井元

收稿日期:2020-10-16。

第一作者简介:王浩宇(1988—),男,硕士,助理研究员,主要从事页岩气随钻跟踪及评价方面的研究工作。地址:四川省成都市高新区吉泰路688号中国石化西南科研办公基地,邮政编码:610041。E-mail:604247026@qq.com

基金项目:中国石化科技部“十条龙”项目“威远—永川深层页岩气开发关键技术”(P18058)。

素、地震曲率等资料进行指导分段,但存在资料主次不清、未建立合适的选段步骤、出方案耗时较长的问题。目前威荣页岩气田已进入产能建设开发期,一、二期共部署23台160余口井,面对上百口井,为节约勘探开发成本,大量开发井不再施工导眼,取而代之的是在开发平台井南北半支各选一口井进行三开综合测井。与前期评价井对比,可用的资料少了许多,主要缺少特殊录井、标准测井的部分项目以及岩石实验分析数据等(表1)。原始资料的匮乏给获取平台开发井关键储层评价参数带来了困难。

针对此现状,结合前期评价井测试选段的原则,对后期开发井的选段思路等方面进行深化研究,并合理、高效利用仅有资料、数据,优选出测试选段评价参数,总结出测试选段步骤,形成一套威荣页岩气田水平井测试选段的地质—工程一体化选段技术,这样既提高了选段时效,又对加快页岩气效益开发有着促进作用。

1 测试选段原则和思路

1.1 测试选段原则

要想取得良好的措施效果,主要优选孔隙度较高、气测显示好、有机碳含量较高,避开裂缝漏失段的地质甜点段;另外也要优选出地应力相对较低、高脆性、低黏土、低泊松比、高杨氏模量的易于压裂的工程甜点段^[12-16]。选段原则就是以井眼穿行地质层位差异为基础,测井解释成果为依据,结合元素录井及工程参数指标,以地质+工程“双甜点”评价为基础的分类分段页岩气水平井评价及测试选段。

1.2 测试选段思路

在上述原则指导下,结合目前开发井资料情况,对前期评价井思路上进行深化(图1)。页岩气平台井的综合测试选段包括轨迹穿行分段+地质参数分段+工程参数分段+裂缝预测分段,主要是用轨迹穿行层位差异、储层静态参数、地应力、裂缝预测等资料进行地质—工程一体化测试选段。

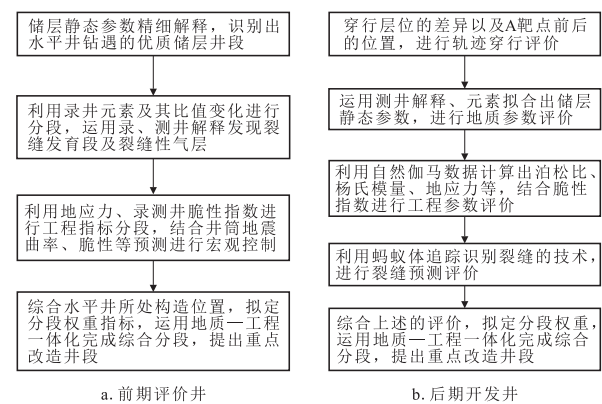


图1 测试选段思路

Fig. 1 Idea of test selection

2 资料准备

由于威荣页岩气田开发井不再实施导眼,测试选段的评价参数不能通过岩心分析获取有机碳含量、含气量、孔隙度等关键评价参数,要对平台收集的资料进行处理,结合测试选段思路,主要从轨迹、地质、工程、裂缝预测等四大方面对数据进行分类利用。

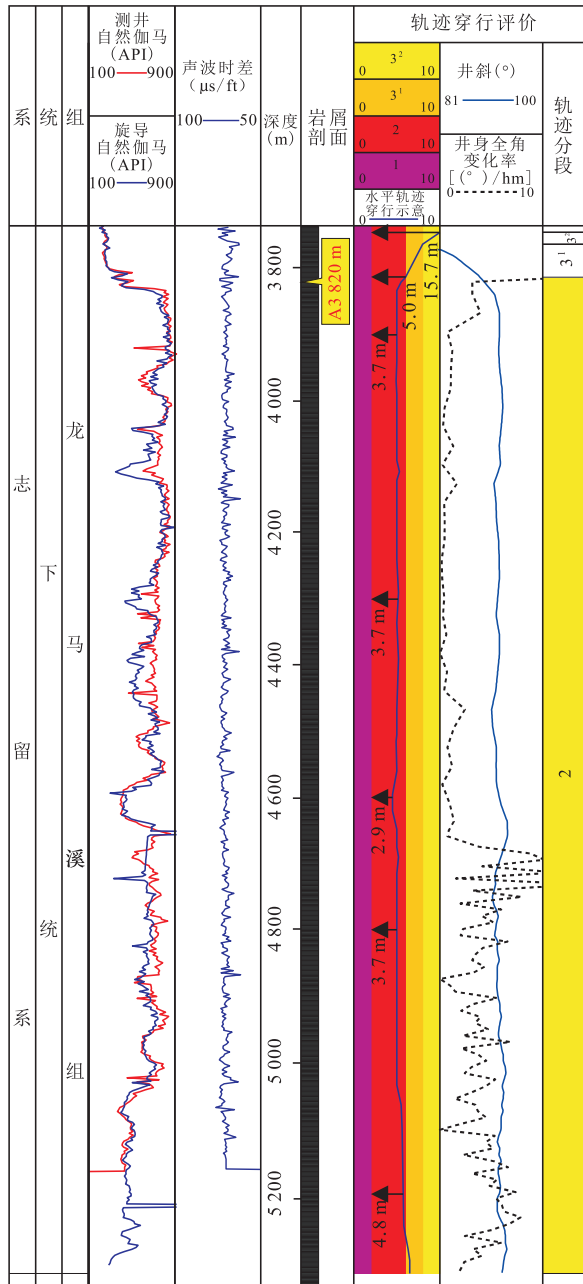
表1 页岩气开发水平井测试选段基础资料

Table 1 Basic data for shale gas development horizontal well testing selection

项目	前期评价井	后期开发井
录井	钻时、密度、全烃、C、特殊录井(元素、地化、矿物录井、岩心扫描)	钻时、密度、全烃、C、特殊录井(元素)
测井(三开)	随钻测井(自然伽马一带方位伽马、密度)标准测井(伽马能谱、补偿声波、补偿中子、高分辨率阵列感应、双井径、井斜、方位) 工程测井(自然伽马、声幅、变密度、磁定位) 特殊测井(偶极声波、岩性扫描、FMI)	随钻测井(自然伽马一带方位伽马) 标准测井(自然伽马、阵列感应、双井径) 工程测井(套管伽马、声幅变密度、磁定位) 特殊测井(偶极声波)
岩心、岩屑	岩心描述、实验分析数据	岩屑次生矿物
地震	地震剖面、曲率剖面、脆性剖面、DHSR剖面	使用蚂蚁体追踪技术
其他	异常工况、水平段钻遇小层数据	异常工况、水平段钻遇小层数据

2.1 轨迹参数

威荣页岩气田的水平井轨迹设计在开发2小层高伽马Ⅲ号峰页岩段穿行,实际钻遇过程中难免遇到揉皱、隐蔽断层或复杂构造情况,导致轨迹穿行到五峰组、临湘组或其他层位。需要统计穿行层位、水平井轨迹距离五峰组顶底的距离(图2中箭头指向位置为五峰组顶),这样给工程上压裂缝高设计提供基础数据。(图2、表2)



注: 1 ft=0.304 8 m。

图2 X-1HF井轨迹参数

Fig. 2 Trajectory parameters of Well-X-1HF

表2 X-1HF井水平井轨迹距离五峰组顶底统计
Table 2 Trajectory distance of horizontal Well-X-1HF from top and bottom of Wufeng Formation

井深(m)	垂深(m)	距五峰顶距离(m)	距五峰底距离(m)	备注
3 745	3 616.08	15.7	20.1	3 ² 顶
3 813	3 625.00	5.0	9.4	2顶
3 900	3 623.19	3.7	8.1	2中
4 300	3 609.70	3.7	8.1	2中
4 600	3 602.10	2.9	7.3	2下
4 800	3 594.92	3.7	8.1	2中
5 200	3 580.17	4.8	9.2	2上

2.2 地质参数

充分利用直导眼或邻井岩心分析实测数据,建立可靠的储层静态参数测、录井解释模型,对随钻伽马和元素录井数据(各种元素含量)进行计算处理,可获取水平井的评价参数有机碳含量、孔隙度、含气量及脆性矿物含量,相关系数(R)较高,分别为 $R^2=0.889\ 65, 0.832\ 24, 0.920\ 5, 0.861\ 65$ (图3)。对有测井资料的井,可用3种方法拟合出的地质参数进行对比,提高拟合解释的精度(图4)。

2.3 工程参数

利用前期开展模拟地层条件的岩心三轴测试,获得五峰组—龙马溪组页岩弹性模量、泊松比等力学参数实测数据,标定测井计算模型,经对比计算与实测力学参数相关系数大于0.67,相关性较好。可用自然伽马数据拟合出泊松比、杨氏模量、地应力、脆性等一系列关键评价工程参数(图5、图6)。

2.4 裂缝预测

前期评价井的裂缝预测主要是结合元素录井、气测录井,通过岩屑次生矿物标志准确识别裂缝型气层,并根据测井声波、电阻率参数、偶极声波解释以及地震的曲率推断出裂缝发育段。后期效益开发中,在测井资料较少的情况下,蚂蚁体追踪技术的优势能较准确识别出裂缝、断裂的相对位置,能够快速了解工区内断层的发育和展布情况(图7);而曲率是对小的挠曲、褶皱等特征有更好的识别,对于区域预测断层、裂缝位置会出现很大的偏差。故曲率多用于水平段轨迹的调整,平台开发井裂缝预测多用蚂蚁体追踪技术^[17-21]。

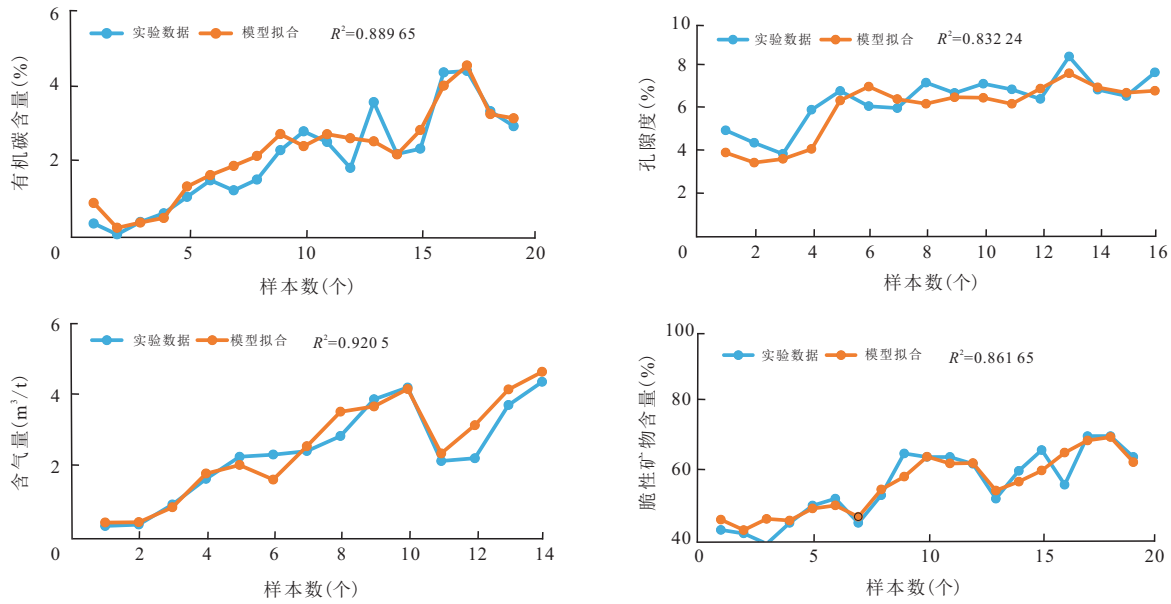
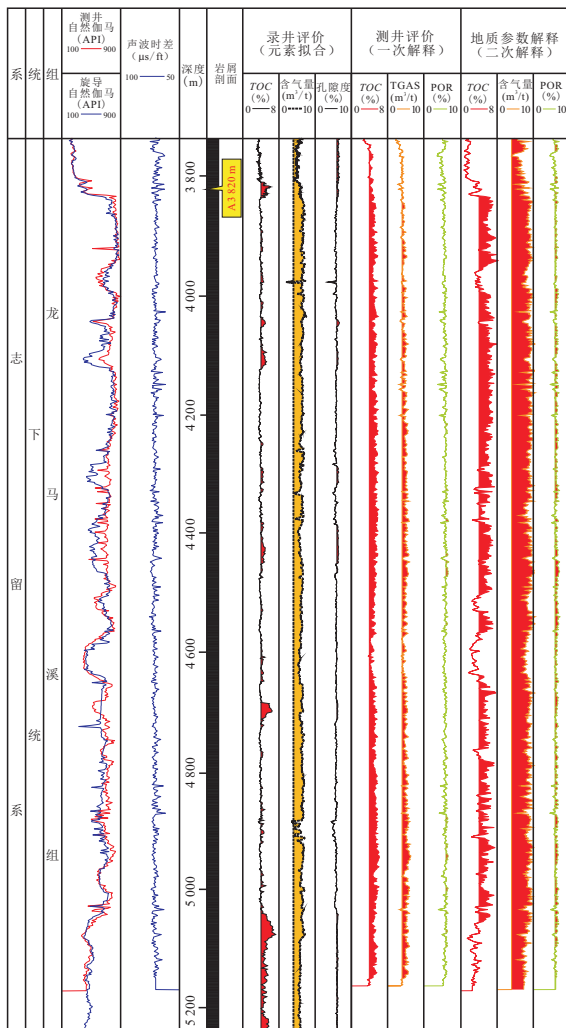


图3 储层静态参数模型拟合对比

Fig. 3 Comparison of reservoir static parameter model fitting



注: 1 ft=0.304 8 m.

图4 X-1HF井地质参数

Fig. 4 Geological parameters of Well-X-1HF

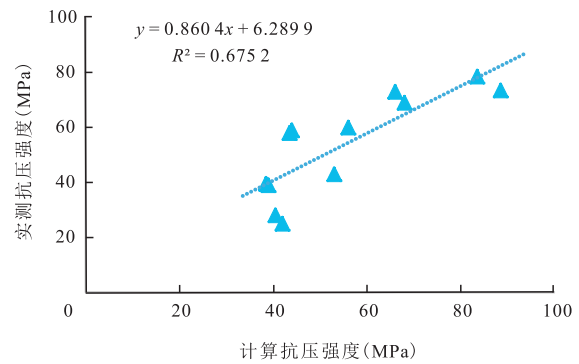


图5 X-1HF井模型计算与实测数据对比

Fig. 5 Comparison of Well-X-1HF model calculation and experimental data

为了更加有效指导工程压裂,提出压裂可能存在风险区,对裂缝预测方法进行了分级(表3)。

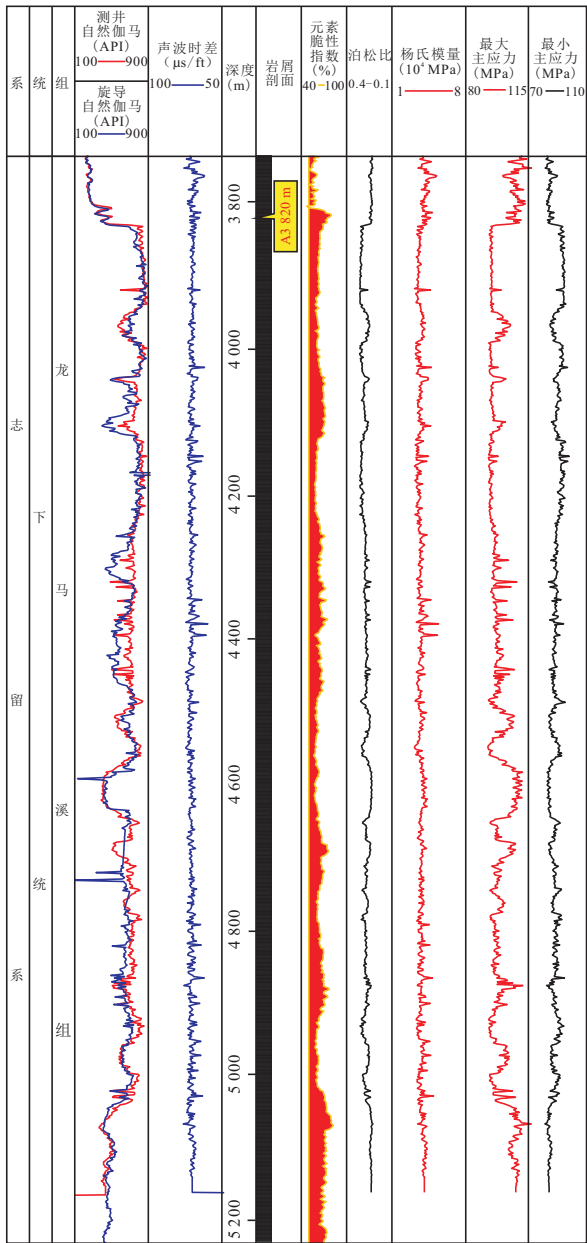
3 测试选段步骤

根据测试选段原则、思路、基础资料处理,提出适合威荣页岩气田水平井的测试选段步骤。

1) 根据水平段轨迹穿行层位的差异、A靶点位置,进行轨迹穿行评价及分段(图2)。

2) 根据测井参数、元素录井(XRF)参数拟合计算,优选出有机碳含量、含气量、孔隙度、脆性指数等关键指标,进行储层静态参数精细解释,开展地质参数评价,识别出水平井钻遇的优质储层井段(图3)。

对于有测井资料的井,可通过对录井、测井、二次解



注: 1 ft=0.304 8 m.

图6 X-1HF井工程参数

Fig. 6 Engineering parameters of Well-X-1HF

释进行综合对比,及时调整拟合模型,故有测井资料的井地质分段精度较高。

3) 利用测录井数据、前期导眼井的分析资料,运用合适的模型计算出最大、最小主应力、泊松比、杨氏模量等工程参数。以最小主应力的变化进行大

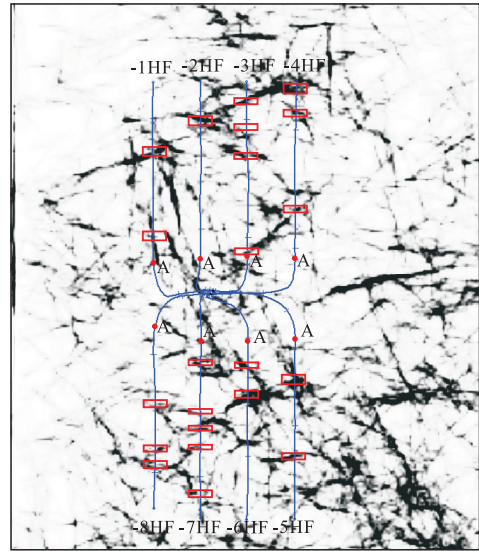


图7 X平台井蚂蚁体裂缝预测

(红色框为预测裂缝范围,蓝色线为井轨迹)

Fig. 7 Prediction of ant body cracks of wells in X platform
(The red box is the predicted fracture range, and the blue line is the well trajectory)

段控制,再找出低应力、低泊松比、高杨氏模量的段进行详细划分,进行工程参数分段(图6)。

4) 运用蚂蚁体追踪技术,识别出平台区域上的可能裂缝发育处,结合裂缝分级预测表,开展裂缝预测分段(图7)。

5) 运用地质—工程一体化,综合轨迹、地质、工程、裂缝因素,结合水平井实钻结果,拟定综合分段各指标的主次关系,完成综合分段,实现“一段一方案”的精细分段评价(图8)。

与前期工作步骤最大的区别是在于裂缝预测单独分段,并提出工程压裂施工中可能存在的风险区;综合分段由之前的5~10段(图9)精细到10~15段(图8),分段依据都有迹可循,给工程压裂设计提供了技术支撑。

4 应用效果

以Y-2HF井为例。该井是四川盆地川西南坳陷的一口开发井(水平井),目的层龙马溪—五峰组,水

表3 裂缝预测分级标准

Table 3 Classification standards for crack prediction

项目	识别	分级	图充填颜色
实钻断裂、裂缝	岩屑次生矿物、气测显示、声波跳跃、地层连续性等	I级	红色
蚂蚁体	表征裂缝发育区	II级	橙色

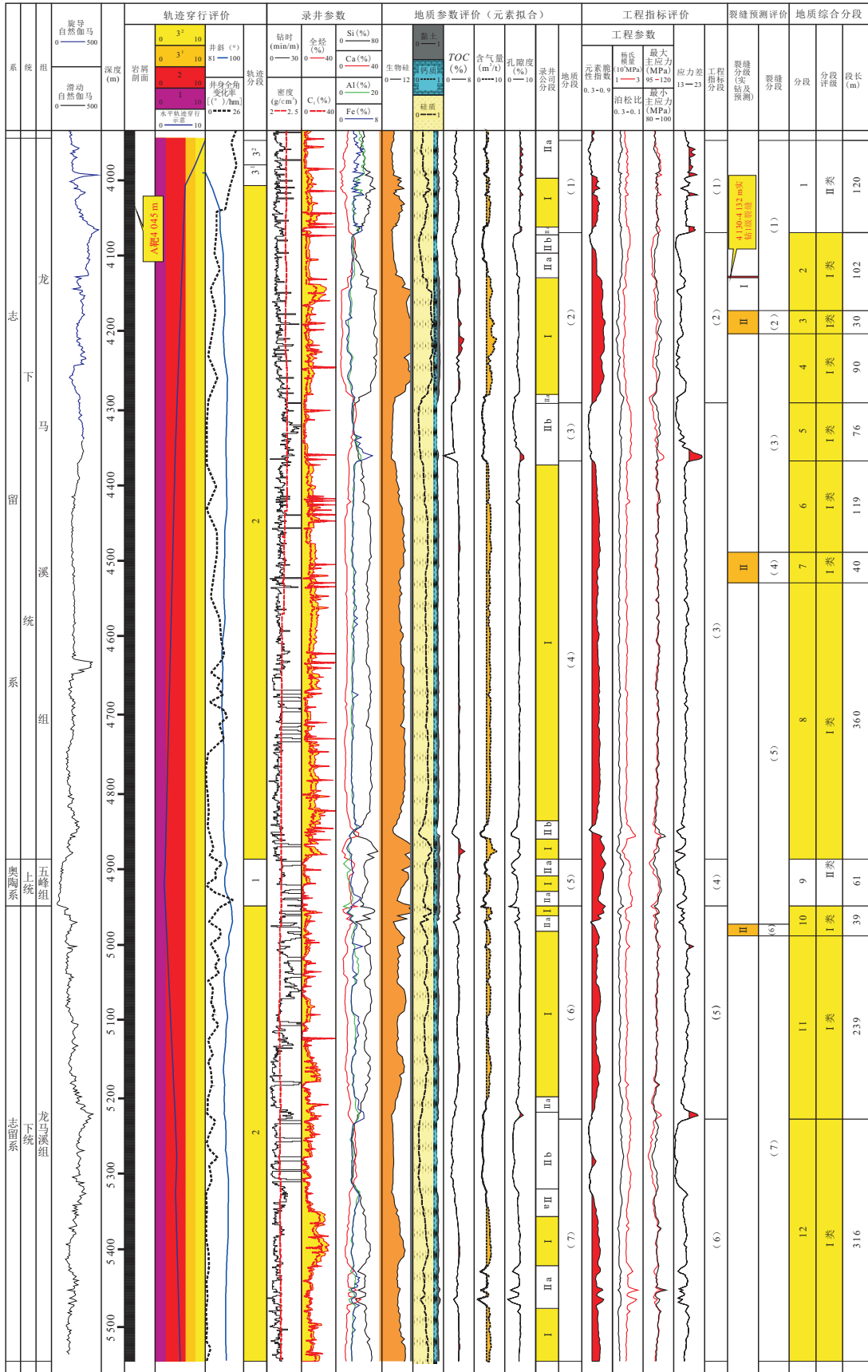
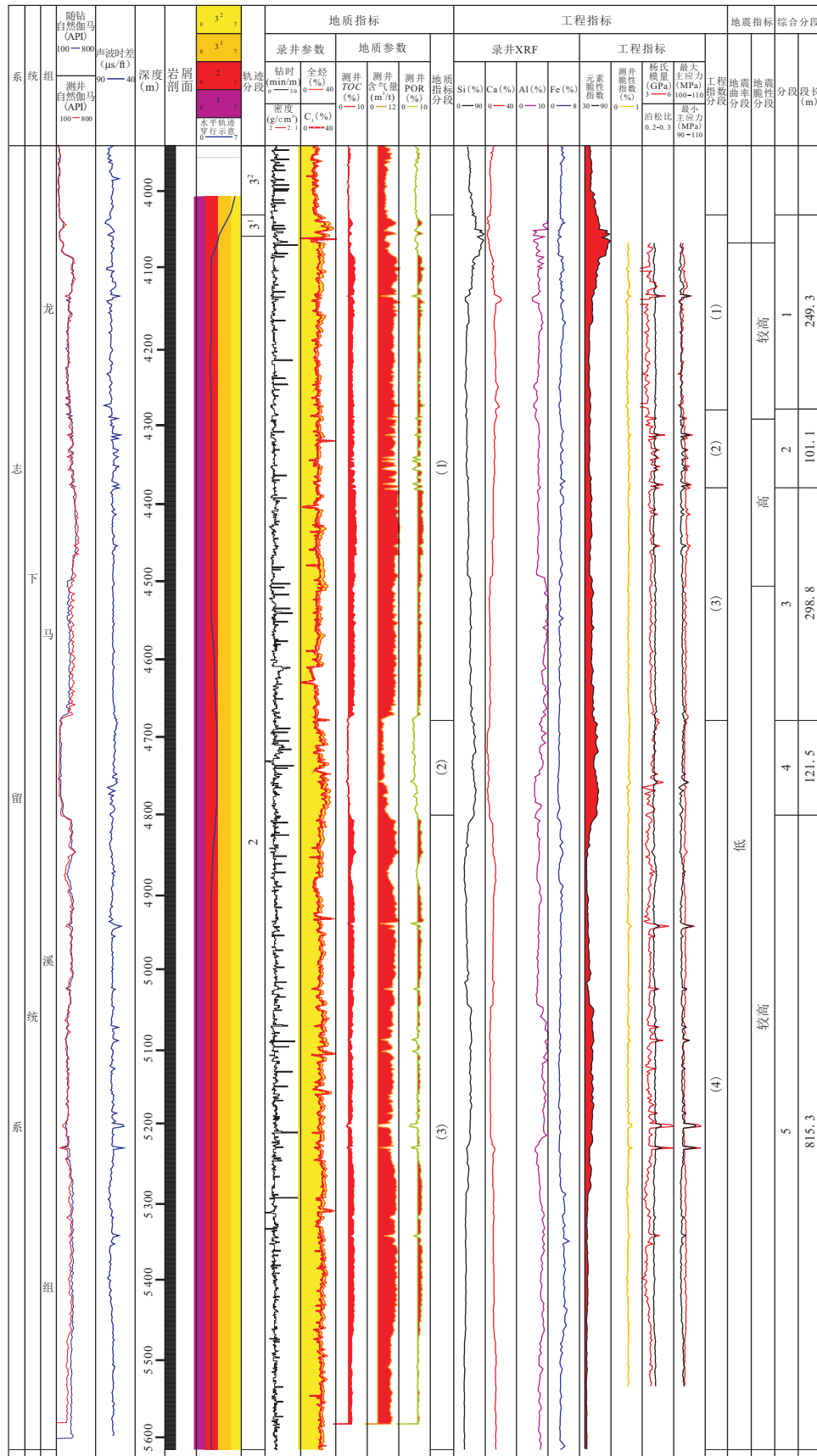


图8 Y-2HF开发井综合分段
Fig. 8 Comprehensive section of development well Y-2HF



注:1 ft=0.3048 m。

图9 前期某评价井测试选段综合分段

Fig. 9 Comprehensive segmentation of an evaluation well in the early stage

表4 Y-2HF开发井综合分段分类
Table 4 Comprehensive classification of development well Y-2HF

分段	顶深(m)	底深(m)	层厚(m)	轨迹位置	裂缝预测	综合评价	备注
1	3 953	4 073	120	3 ² -2		Ⅱ类	高应力段
2	4 073	4 175	102	2	4 130 ~ 4 132 m(实钻1级)	Ⅰ类	实钻裂缝段
3	4 175	4 205	30	2	4 175 ~ 4 205 m(蚂蚁体预测2级)	Ⅰ类	预测裂缝区
4	4 205	4 295	90	2		Ⅰ类	
5	4 295	4 371	76	2		Ⅰ类	
6	4 371	4 490	119	2		Ⅰ类	
7	4 490	4 530	40	2	4 490 ~ 4 530 m(蚂蚁体预测2级)	Ⅰ类	预测裂缝区
8	4 530	4 890	360	2		Ⅰ类	
9	4 890	4 951	61	1		Ⅱ类	钻遇五峰组、套变段
10	4 951	4 990	39	2	4 975 ~ 4 990 m(蚂蚁体预测2级)	Ⅰ类	预测裂缝区
11	4 990	5 229	239	2		Ⅰ类	
12	5 229	5 545	316	2		Ⅰ类	

平段长约1 500 m。整个水平段均轨迹大部分在2号开发小层穿行,因遇褶皱,钻遇部分五峰组,优质储层钻遇率达到96%;全烃最高达63%,C₁高达40%。轨迹穿行评价根据穿行的位置分段划分4段;地质参数评价以有机碳含量、元素曲线、伽马曲线为主划分7段;工程参数评价以最大、最小主应力为主划分6段;裂缝预测评价用蚂蚁体追踪技术识别出相对裂缝发育段3段,并在井深4 130~4 132 m钻遇裂缝。通过上述评价进行综合分段,划分出12段总长1 592.00 m(含靶前段92 m)(图9、表4),并优选出重点改造段,见图9中黄色部分。

通过新的测试选段技术,有效识别出了地质+工程的最优段(Ⅰ类),提出了工程施工可能存在的套变段(综合分段第1、9段)和压窜区域(综合分段第2、3、7、10段)(表4),有效指导了工程压裂设计,为压裂施工提供良好的条件。也使得测试无阻流量从前期评价井(15~38)×10⁴ m³/d提升至(30~55)×10⁴ m³/d,提高了1~2倍左右。

另外,此次测试选段方案从数据收集、处理到最后确定分段共花费12个工作日左右,出方案时间较之前快了40%(表5),尤其是在资料收集、数据处理、分段思路、材料编写4个环节耗时都有所降低,提高了页岩气产建滚动开发的效率。

5 结论

1) 在资料匮乏的情况下,可通过对测、录井数据进行有效分析处理获得测试选段的关键评价参数

表5 使用新技术前后耗时对比

Table 5 Time-consuming comparison before and after using new technology

项目	耗时(d)		较前期提升(%)
	前期评价井	后期开发井	
资料收集	5	3.5	30.0
数据处理	8	5.0	37.5
分段思路	3	1.5	50.0
材料编写	4	2.0	50.0
合计	20	12.0	40.0

(如:总有机碳、含气量、孔隙度、最大最小主应力等),满足了测试选段所需的基本数据要求。

2) 选段原则就是以井眼穿行地质层位差异为基础,测井解释成果为依据,结合元素录井及工程参数指标,以地质+工程“双甜点”评价为基础的分类分段页岩气水平井评价及测试选段。

3) 创新性提出了以轨迹穿行分段、地质参数分段、工程参数分段、裂缝预测分段为主的“一段一方案”精细综合分段的“五步法”水平井测试选段技术。

4) 此技术在现场应用中取得良好效果,开发井的测试无阻流量较前期评价井提高1~2倍左右,节约40%出方案时间,加快了页岩气效益开发的步伐。

参考文献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):561-574.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [2] 马新华,谢军.川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J].石油勘探与开发,2018,45(1):161-169.

- Ma Xinhua, Xie Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 161-169.
- [3] 董大忠,王玉满,李新景,等.中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J].*天然气工业*,2016,36(1):19-32.
Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(1): 19-32.
- [4] 马永生,冯建辉,牟泽辉,等.中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J].*中国工程科学*,2012,14(6):22-30.
Ma Yongsheng, Feng Jianhui, Mou Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in SINOPEC[J]. *Strategic Study of CAE*, 2012, 14(6): 22-30.
- [5] Algeo T J, Lyons Y W. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleoredox and paleohydrographic conditions[J]. *Paleoceanography*, 2006, 21: 1-23.
- [6] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665-677.
- [7] 石强,陈鹏,王秀芹,等.页岩气水平井高产层识别方法及其应用:以四川盆地威远页岩示范区下志留统龙马溪组为例[J].*天然气工业*,2017,37(1):60-65.
Shi Qiang, Chen Peng, Wang Xiuqin, et al. A method for identifying high-productivity intervals in a horizontal shale gas well and its application: A case study of the Lower Silurian Longmaxi Fm in Weiyuan shale gas demonstration area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(1): 60-65.
- [8] 靳宝军.梨树断陷储层改造选井选层研究[J].*油气井测试*,2014,23(4):18-23.
Jin Baojun. Research on well selection and layer selection for reservoir reformation in Lishu fault depression[J]. *Well Testing*, 2014, 23(4): 18-23.
- [9] 段文燊,吴朝容,石磊,等.川西须二段测录井特征与测试选层研究[J].*石油天然气学报*,2011,33(6):86-91.
Duan Wenshen, Wu Chaorong, Shi Lei, et al. Research on logging characteristics and testing layer selection in the second member of Xujiahe Formation in western Sichuan[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2011, 33(6): 86-91.
- [10] Zhao Z H, Wu K D, Fan Y, et al. An optimization model for conductivity of hydraulic fracture networks in the Longmaxi shale, Sichuan basin, Southwest China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1-2): 47-54.
- [11] 袁发勇.地层测试资料在措施选层中的应用[J].*江汉石油职工大学学报*,2013,26(6):24-27.
Yuan Fayong. On application of formation testing data in selected zone by measures[J]. *Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers*, 2013, 26(6): 24-27.
- [12] 王玉芳,翟刚毅,王劲铸,等.四川盆地及周缘龙马溪组页岩产气效果影响因素[J].*地质力学学报*,2017,23(4):540-547.
Wang Yufang, Zhai Gangyi, Wang Jinzhu, et al. Factors influencing gas production effectiveness of Longmaxi formation shale in Sichuan basin and adjacent areas[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(4): 540-547.
- [13] 郭伟.四川威远区块页岩气水平井产量差异分析[J].*科学技术与工程*,2018,18(1):228-233.
Guo Wei. Analysis on production variation of shale gas horizontal wells in Weiyuan Block, Sichuan[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(1): 228-233.
- [14] 朱筱敏,潘荣,朱世发,等.致密储层研究进展和热点问题分析[J].*地学前缘*,2018,25(2):141-146.
Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhu Shifa, et al. Research progress and core issues in tight reservoir exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(2): 141-146.
- [15] 黎铨,蔡军,张君子,等.赛东洼槽碎屑岩储集层压裂录井选层方法[J].*录井工程*,2018,29(4):13-19.
Li Cheng, Cai Jun, Zhang Junzi, et al. Mud logging optimizing horizon for fracturing clastic rock reservoir in Saidong trough[J]. *Mud Logging Engineering*, 2018, 29(4): 13-19.
- [16] Zheng H R, Zhang J C, Qi Y C. Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1-2): 36-46.
- [17] 孙乐,王志章,李汉林,等.基于蚂蚁算法的断裂追踪技术在乌夏地区的应用[J].*断块油气田*,2014,21(6):716-721.
Sun Le, Wang Zhizhang, Li Hanlin, et al. Application of fault tracking technology based on ant colony algorithm in Wuxia Area[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2014, 21(6): 716-721.
- [18] Randen T, Perdensen S I, Sønneland L. Automatic extraction of fault surfaces from three-dimensional seismic data[C]// paper SEG-2001-0551 presented at the SEG Annual Meeting, 9-14 September, 2001, San Antonio, Texas, United States.
- [19] 史刘秀,王静波,张如伟,等.复值相干模量蚂蚁体技术[J].*断块油气田*,2015,22(5):545-549.
Shi Liuxiu, Wang Jingbo, Zhang Ruwei, et al. Ant tracking technology based on complex-valued coherence[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2015, 22(5): 545-549.
- [20] 梁宇涛,刘鹏程,冯高城.基于蚂蚁追踪技术的裂缝型储层建模方法[J].*复杂油气藏*,2014,7(3):11-15.
Liang Yutao, Liu Pengcheng, Feng Gaocheng. Modeling of fractured reservoirs based on ant tracking technology[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2014, 7(3): 11-15.
- [21] 杨瑞召,李洋,庞海玲,等.产状控制蚂蚁体预测微裂缝技术及其应用[J].*煤田地质与勘探*,2013,41(2):72-75.
Yang Ruizhao, Li Yang, Pang Hailing, et al. Prediction technology of micro fractures by occurrence-controlled ant body and its application[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2013, 41(2): 72-75.

(编辑 李青)