

动静因素双重约束下储层压裂综合决策方法

徐凤兰,李琳琳,王永军,华莹,陈海君,刘学忠

中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

通讯作者:Email:443574953@qq.com

项目支持:渤海钻探工程有限公司科技研发类项目“华北重点区带测试评价技术与措施选层方法研究”(2016Z35K)

引用:徐凤兰,李琳琳,王永军,等.动静因素双重约束下储层压裂综合决策方法[J].油气井测试,2019,29(5):67-73.

Cite: XU Fenglan, LI Linlin, WANG Yongjun, et al. Comprehensive decision-making method for reservoir fracturing under dual constraints of dynamic and static factors[J]. Well Testing, 2019,29(5):67-73.

摘要 依靠钻井、测井、录井、取心资料的综合经验判断压裂选层,措施有效率低,具有一定的局限性。基于动静资料结合的流动单元法在统计分析二连探区60井层压裂措施资料基础上,根据压裂区域压力测试曲线及双对数-导数曲线特征,按照压裂效果好坏,将这些井层分为A、B、C三种类型,并建立压裂目标区域流动单元图版。绘制目标井压前实测压力历史曲线及压力-导数双对数诊断曲线,比照曲线分类标准与措施效果统计结果,可确定压裂改造选层。2018年11层应用表明,措施建议符合率100%,压裂有效率提高32%。该方法可定性、半定量为压裂选层提供依据,为优选压裂层位和优化压裂方案提供技术支持。

关键词 动态资料;静态资料;定性;半定量;压裂选层;压裂效果;二连油田

中图分类号:TE353

文献标识码:B

DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2019.05.011

Comprehensive decision-making method for reservoir fracturing under dual constraints of dynamic and static factors

XU Fenglan, LI Linlin, WANG Yongjun, HUA Ying, CHEN Haijun, LIU Xuezhong

Well Testing Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: Selecting fracturing layer by comprehensive experience of drilling, logging and coring data is inefficient and has certain limitations. After statistically analyzing of fracturing measures data of 60 wells in Erlian exploration area, the flow unit method which combines static with dynamic data, divides the fracturing effect of the layers into three types: A, B and C by according to the characteristics of pressure test curve and log-derivative curve in fracturing area. Then the flow unit chart of fracturing target area is established. By drawing the measured pressure history curve and pressure-derivative double logarithmic diagnostic curve of the target well before fracturing, comparing with the classification criteria of curve and the statistical results of the effect of measures, the formation selection for fracturing construction can be determined. The application of 11 layers in 2018 shows that the compliance rate of the proposed measures is 100% and the fracturing efficiency is increased by 32%. This method can provide qualitative and semi-quantitative basis for fracturing layer selecting, and provide technical support for optimizing fracturing layer and fracturing scheme.

Keywords: dynamic data; static data; qualitative; semi-quantitative; fracturing layer selection; fracturing effect; Erlian oilfield

措施选层是决定措施效果、减小措施投资风险的关键环节之一。目前,基本还停留在应用一系列静态资料,结合数理统计方法进行综合判别分析等传统做法。由于静态资料勘测范围的狭窄性,使得分析结果具有一定的盲目性和主观性。尤其对于特殊岩性或者复杂储层常常显得无能为力,措施成功率差。

国内的研究学者也逐渐认识到这一问题,鉴于储层措施是多项因素综合作用的结果,影响措施效

果的原因复杂多样,采用简单的数学算式难以处理,故统计学中的模糊评判法和聚类分析方法就逐渐发展起来了。1996年,肖芳淳^[1]通过分析压裂的主要影响因素,并进行分类研究后,采用模糊物元评价分析模型对措施井层进行了优选。1997年,蒋廷学^[2]通过该方法,对重复压裂的影响因素和压裂井层进行了研究。2001年,在模糊等价关系研究的基础上,付永强等^[3]得出一种可应用于油井压裂措

施选层中的多层次聚类方法。2004年,郭建春等^[4]从压裂层的选择干扰因素出发,提出了不确定性数学分析法,减少人为因素的参与。2014年,梁冲等^[5]采用聚类分析、人工智能等方法,以让纳若尔油田300多口井改造井资料为基础,建立了适合该油田碳酸盐岩储层特征条件的重复酸压选井模型。2018年,杨小涛等^[6]从地层、岩性、压后产量等因素分析出发,开展了火成岩储层压裂工艺研究,形成了“转向与油水置换”压裂工艺。

上述分析发现,采用聚类分析及模糊评判法很大程度上取决于样本数的精度和数量,且需要人为分配确定评价因素的权重,有时也因一些井缺少部分参数,使得选层结果与矿场实际相去甚远。

为了降低统计学中的人为干扰因素,发展了人工智能元法。2001年,吴亚红等^[7]首次提出将人工神经网络方法引用到压裂选层决策上来,解决了传统数学方法无法描述压裂参数之间非线性关系的问题。2002年,刘洪等^[8]通过研究,利用模糊神经网络系统(FNNS)建立压裂效果影响因素与压裂效果的关系函数,实现量化措施选井选层。2003年,杜卫平等^[9]通过进一步扩充压裂措施影响因素,增加了地质特征、测试和生产数据等多方面因素,建立更为符合实际的措施选层模型。刘长印等^[10]将前人研究的理论方法进行软件化,形成了人工智能化系统,推动了油气井压裂措施优选工作的实际应用进程。但是人工智能元法缺乏对油井压裂措施主要影响因素的深入分析。

在国外,油井压裂选层主要采用人工神经网络方法。1976年,Reeves S. R.等^[11]通过比较统计学、曲线分类和人工智能等多种方法的准确性,发现人工智能方法在油井措施选层中的准确性最高,进而人工智能方法开始应用于油田措施选层。1998年,Oberwinkler C.等^[12]通过分析压裂影响因素与压裂效果的关系,确定主控因素后,使用人工神经网络方法训练和测试这些数据,以结果确定压裂措施井层。1999年,Robert F. S.^[13]使用人工神经网络预测压裂井压后产量并与实际产量进行对比,将差距最大的井作为重复压裂井的首选目标。2000年,Mohaghegh S.等^[14-15]优化了用于解决油井压裂措施选层的神经网络结构,使得这方面的研究上了一个新的台阶,使用遗传算法对多种压裂井神经网络模型进行优选,后利用优选出的模型进行压裂选井选层,整个过程实现了高度智能化。但是,对于油井

压裂的主要影响因素及程度高低均未见相关的研究,一般都是依靠计算机的多种统计学算法来解决油井压裂措施分析问题。

无论是统计学中的模糊评判法,还是人工神经网络元法,考虑较多的都是通过储层静态资料预测压裂措施效果的优劣。为此,2005年,王发现等^[16]根据压前测试及试井曲线形态对压后效果进行预测。2011年,王广林等^[17]通过对试井曲线过渡段、径向流段起始时间的统计分析,以及曲线主要阶段特征,与储层静态参数结合,提出了低渗储层压裂选层的原则及条件。2017年,李琳琳等^[18]提出利用压前试井动态曲线类型进行定性分析,进而判断试油井压裂是否有效,对高渗透、中低渗透、中-高压低渗透、污染堵塞曲线类型判断为压裂有效,对低压低渗透、特低渗透、能量衰竭型曲线类型井层判断为压裂无效。由于仅仅根据测试曲线类型来判断,未对储层含油气性和储层厚度等因素进行考虑。所谓有效,仅反映压裂后增液量较多、工艺效果较好,但如果压裂后出水是无法进行预测的。

笔者以二连油田重点区带复杂砂岩油藏地层测井、压前及压后地层测试资料为基础,通过综合分析对比,提出了储层压裂选层新方法——流动单元法。首次将油藏的动、静参数联合起来,实现储层措施效果预测,为压裂措施前的决策阶段提供了定性和半定量两个层面选层依据,显著提高了压裂决策的准确度。

1 措施效果影响因素分析

将收集到的二连探区赛汉和乌兰花地区60井层的压裂措施资料,按照压裂后增液效果进行了分类:第Ⅰ类,压裂效果好。这类储层在压后获得了不小于 $10\text{ m}^3/\text{d}$ 的产量;第Ⅱ类,压裂有效。这类储层在压后获得了大于工业油流的日产量,但压后产量小于 $10\text{ m}^3/\text{d}$;第Ⅲ类,压裂无效。这类储层在压后液量没有明显增加,或者未达到工业油流标准。

1.1 压裂效果优劣与动态资料相关性分析

将三种压裂效果与试井的实测压力历史曲线、试井压力及其导数双对数曲线进行统计归类,发现主要存在以下规律:

压裂效果好的井层。首先其压前实测压力历史展开图显示,经多次开关井后压力没有衰减,且传导速度有所增强(图1);其次,导数曲线在较短时间内达到径向流动段,并且开口明显(图2);第三,

储层存在污染的比例较高,占统计样本数的 71%。

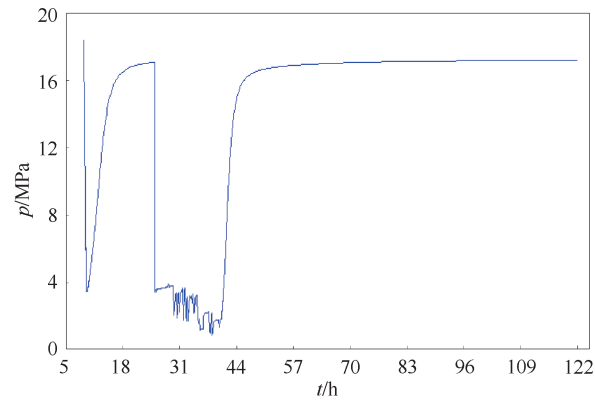


图 1 压裂效果好的井压前实测压力历史图
Fig.1 History of measured pressure in good fracturing effect wells before fracturing

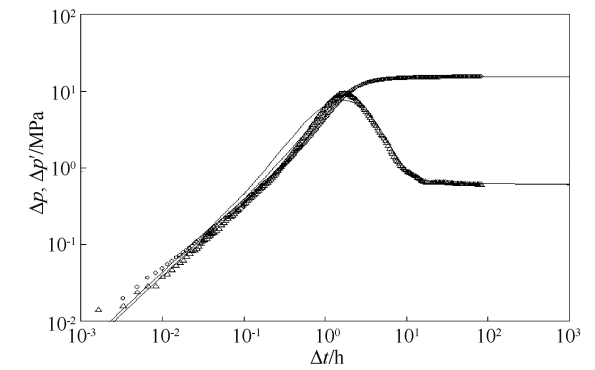


图 2 压裂效果好的井压前双对数曲线图
Fig.2 Logarithmic curves in good fracturing effect wells before fracturing

压裂有效的井层。首先,实测压力历史图中一次关井通常在 15 h,不能取得稳定地层压力(图 3)。

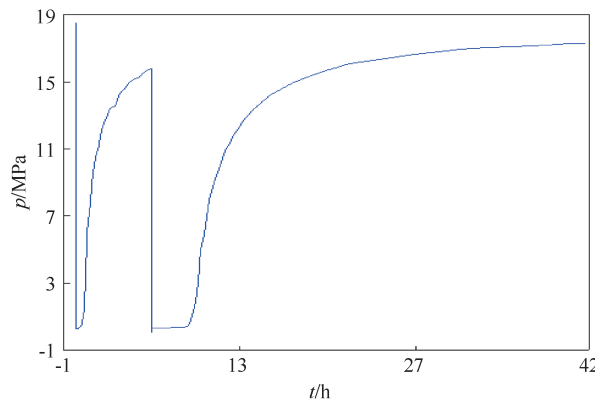


图 3 压裂见效井压前实测压力历史图
Fig.3 History of measured pressure in good fracturing effect wells before fracturing

其次,压力没有明显衰减趋势,如果是短暂的二次开井,二次关井通常比一次关井压力要高(图 3);第三,二次关井双对数导数曲线未出现径向流

动段(图 4)的井层较多,占统计井数的 69%。

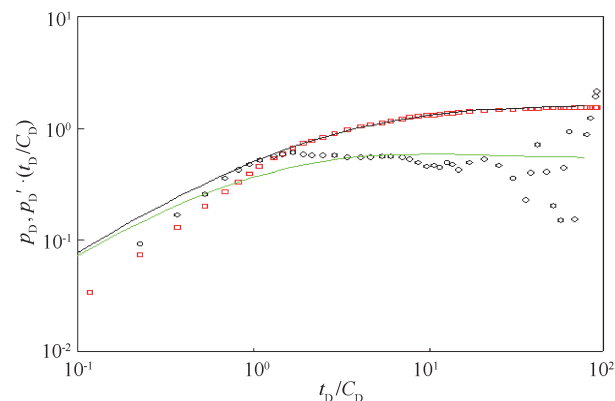


图 4 压裂见效井压前双对数曲线图
Fig.4 Logarithmic curves in good fracturing effect wells before fracturing

压裂无效井层。首先,实测压力历史图中一次关井通常在 15 h 不能取得稳定地层压力(图 5)。

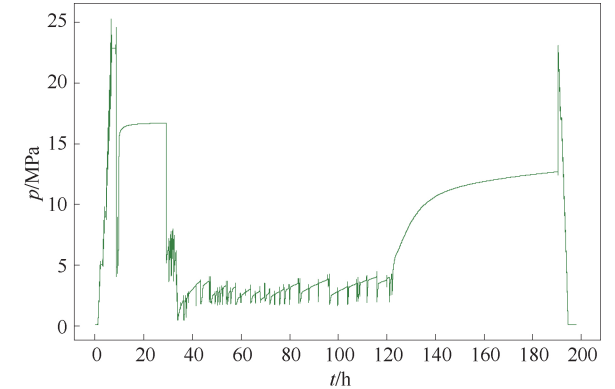


图 5 压裂无效井压前实测压力历史图
Fig.5 History of measured pressure in fracturing invalid well before fracturing

其次,二次关井双对数导数曲线未出现径向流动段的井比例较压裂有效井增加至 100%(图 6);第三,二次关井通常比一次关井压力要低(图 5)。

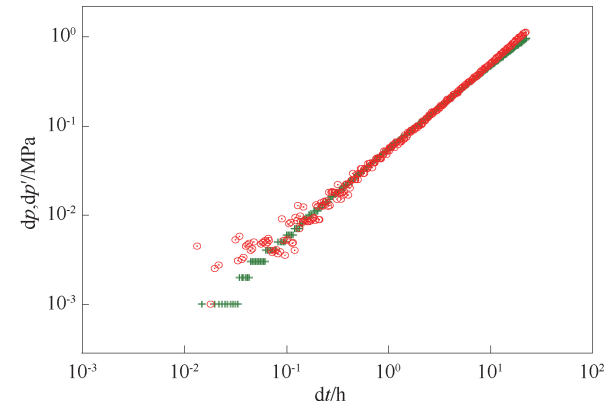


图 6 压裂无效井压前双对数曲线图
Fig.6 Logarithmic curves in fracturing invalid well before fracturing

1.2 措施效果与静态资料相关性分析

将静态资料中的参数——储层厚度、孔隙度、电阻率、泥质含量,以及压力系数等 5 大因素与压裂效果进行单因素的敏感性分析。分析结果表明,厚度、孔隙度与压后产量没有明显的关系(相关系数仅为 0.172 5 和 0.105 8);而电阻率低的储层压裂效果较差,电阻率高的压后效果较好;压后产量较高的储层集中在泥质含量低的区域;压力系数高的储层压裂效果好,而压力系数低,压裂无效的比例增加。

由此可见,静态参数和压裂效果具有一定的关系。但由于影响压裂效果的因素众多,每种静态参数和压裂效果之间只能形成定性的关系,无法进一步进行定量分析。

2 措施效果预测方法研究

上述研究表明,压裂效果与动态资料以及静态资料都存在着复杂的关系。为了充分利用动静资料进行压裂决策,笔者提出了基于动静资料的流动单元法。

首先,根据压裂区域压力测试曲线及双对数—导数曲线特征,按照压裂效果好坏,分为 A 型、B 型及 C 型三种类型(表 1),三种类型曲线对应的压裂有效率为:A 型>B 型>C 型。其中,A 型曲线压裂有效率 100%;B 型曲线压裂有效率 87%;C 型曲线压裂有效率 50%。

表 1 措施效果与测试曲线统计表

Table 1 Statistical tables of measures and test curves		
曲线类型	曲线特征	措施有效率/%
A	①压力传导快,且无压力衰减现象;②短时间到达径向流动段,且双对数导数曲线开口较大。	100(措施后产量大于 10 m ³ /d 的比例达到 65%)
B	①压力传导较慢,二关井压力无衰减或无明显衰减;②较晚出径向流或无径向流。	87
C	①压力传导很慢,二关井压力存在明显衰减;②较晚出短暂径向流或无径向流。	50

其次,建立压裂目标区域流动单元图版。该图版横坐标为岩石孔隙体积和颗粒体积的比值 ϕ_z ;纵坐标为储层品质因子 RQI 。横、纵坐标均为对数坐标。

储集层孔隙度和渗透率都是评价储集层品质的重要参数^[19]。孔隙度反映岩石储集空间大小;而渗透率则反映储集层孔隙空间的连通性和岩石的渗流能力。通常由于孔隙结构的复杂性,造成了孔隙度基本相同的储集体之间渗透率差别很大。这样,在低孔低渗储集层中,应用孔隙度或渗透率单一参数对储集层进行岩石物理分类的方法显然不

适用。两者结合形成的用以评价储集层品质的宏观参数就是储层品质指数 RQI 和流动单元指数 FZI ^[20]。相关计算公式如下:

$$\phi_z = \phi_e / (1 - \phi_e) \tag{1}$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{K/\phi_e} \tag{2}$$

式中: RQI 为储层品质因子, μm ; K 为动态有效渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ_e 为有效孔隙度, %。

根据(1)式及(2)式可知,储层品质因子既和静态参数储层孔隙度有关,也和动态参数有效渗透率有关,以此建立起来的流动单元图版能够很好地将静态资料与动态资料结合在一起,起到双因素约束的作用,进而提高压裂决策的准确性。

令
$$FZI = RQI/\phi_z \tag{3}$$

两边取对数得

$$\lg RQI = \lg \phi_z + \lg FZI \tag{4}$$

由(4)式可见,属于同一流动单元的储层,应具有相似的储层动静态物性参数,其在流动单元图版中应是一组彼此平行的直线。

根据压裂目标区域已有压裂井资料,在流动单元图版中确定压裂有效及压裂无效的界限关系式,进而确定各个压裂效果的区域。

按照上述方法,建立了二连盆地乌兰花凹陷的压裂效果与流动因子的关系图版(图 7)。图版表明,压裂有效界限范围是截距大于 0.02。

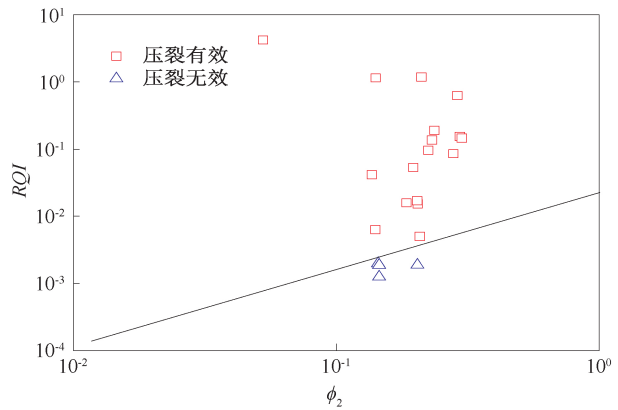


图 7 乌兰花凹陷压裂效果分类的流动单元图版
Fig.7 Flow unit chart of fracturing effect classification in Wulanhua depression

那么,决策一口目标井是否进行压裂措施,就可采用流动单元法。具体操作步骤如下:

(1)绘制目标井压前实测压力历史曲线及压力-导数双对数诊断曲线,比照曲线分类标准与措施效果统计结果,符合 A 类,则直接建议压裂。

(2)若目标井的实测诊断曲线形态特征符合 B

类和 C 类,则根据目标井孔隙度和试井渗透率计算两个参数——储层品质因子和孔隙度比值,并以这两个值作为一个坐标点,绘制在以孔隙度比值为横坐标,储层品质因子为纵坐标的流动单元双对数图版中。若坐标点落在图版中压裂有效区域,则建议压裂;若落在无效区域,则不建议压裂。

3 方法实际应用

分别以二连油田乌兰花凹陷 L13X 井和 H26 井为例,对该方法的科学性和合理性进行检验。

L13X 井主产层为阿尔善组砂岩储层, 2017 年 7 月 26 日~8 月 9 日对射孔井段 1 443. 40~1 456. 60 m 进行了地层测试。采用动态负压射孔+MFE 完井联作测试工艺,三开三关三开抽汲工作制度。实测压力历史曲线可知(图 8),抽汲前二关稳定压力为 9. 79 MPa,三关稳定压力为 8. 20 MPa,压力出现了衰减,衰减值为 1. 59 MPa。选取二关压力恢复流动段,采用 Saphir 试井解释软件,绘制压力及其导数双对数诊断图,如图 9 所示。可以发现,该井未出现径向流动段。

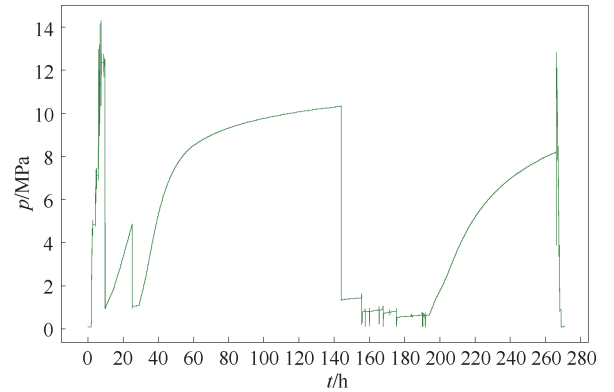


图 8 L13X 井 C1-1 层实测压力历史图
Fig.8 Pressure history of C1-1 Formation in Well L13X

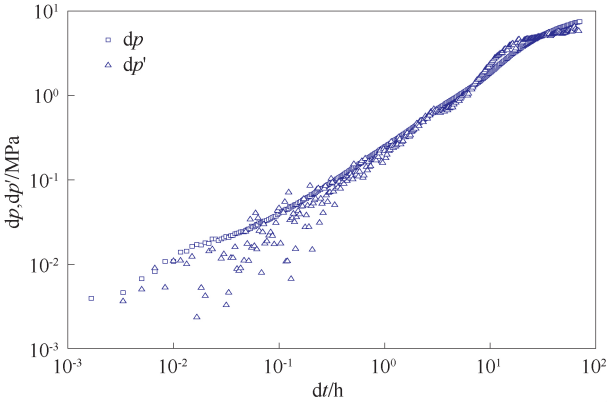


图 9 L13X 井 C1-1 层关井压力及其导数双对数图
Fig.9 Logarithmic diagram of closing pressure and derivative of C1-1 formation in Well L13X

根据压裂区域压力测试曲线及表 1 判断,该井属于 C 类曲线,压裂有效率仅有 57%。因此,继续采用流动单元方法,计算 L13X 井的 $RQI = 0.014 \mu\text{m}, \phi_z = 17.8\%$ 。以储层品质因子 RQI 为纵坐标,以孔隙体系比值 ϕ_z 为横坐标,并将计算的点绘制在建立的流动单元图版中(图 10),显示该井层处于压裂有效区域。因此,建议该井压裂。

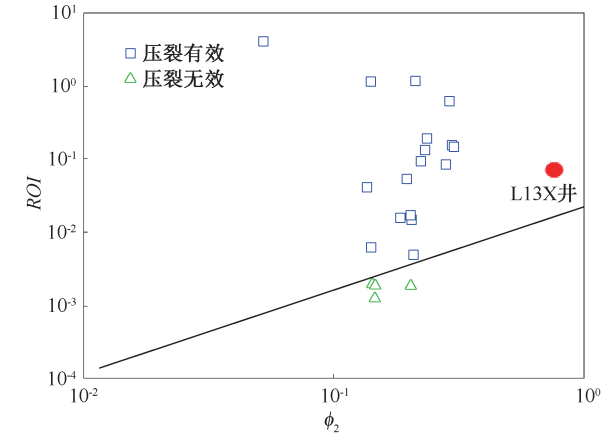


图 10 L13X 井在孔隙度与 RQI 关系图中的位置
Fig.10 Location of Well L13X in the relationship between porosity and RQI

L13X 井在 2017 年 8 月进行了压裂,总液量为 456.44 m^3 ,总砂量为 45.60 m^3 。压裂后定产数据为日产油 7.84 t ,日产水 0.74 m^3 ,达到工业油气流标准,压裂措施有效,与预测结果吻合。

H26 井是内蒙古锡盟东乌旗哈达图 180° 方位 4 km 处的一口预探井,主产层为白垩系储层,2016 年 5 月 24~28 日对射孔井段 1 835. 80~1 883. 40 m 进行了地层测试,选用多流测试阀+抽汲助排的工艺进行井下关井地层测试,压力历史图如图 11 所示。

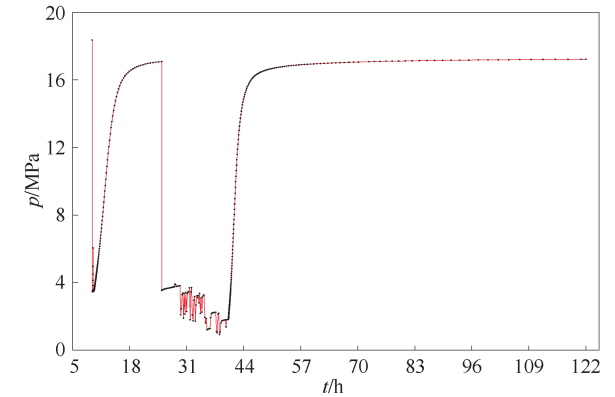


图 11 H26 井 C1-1 层实测压力历史图
Fig.11 Pressure history of C1-1 Formation in Well H26

通过两次开关井方式落实地层累计产油 1.43 m^3 ,产水 0.45 m^3 。抽汲定产日产油 1.21 m^3 ,

对应稳定流压 0.92 MPa,生产压差 15.85 MPa。求取的地层参数表明,该测试层为常压($p = 16.77$ MPa,压力系数 0.93)、低渗($K = 0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)、低污染($S = 2.79$)储层。

实测压力曲线反映(图 11),关井压力具有较大的恢复速率,储层传导压力的能力较强。测试曲线特征属于 A 类(图 12),压裂后 65%比例可以获取高于 $10 \text{ m}^3/\text{d}$ 的产量,建议压裂。

后期压裂期间加入总液量 651.36 m^3 ,总砂量 54.14 m^3 ,压裂效果:油 $13.63 \text{ m}^3/\text{d}$,水 $17.95 \text{ m}^3/\text{d}$ (压裂液)。压裂后,日产油量大于 10 m^3 ,达到了压裂效果好的程度,与之前的预测结果吻合。

该方法相继在二连油田进行了推广应用。2018 年已经应用 11 口井,压裂措施有效率明显增加,措

施建议符合率高达 100%(表 3)。

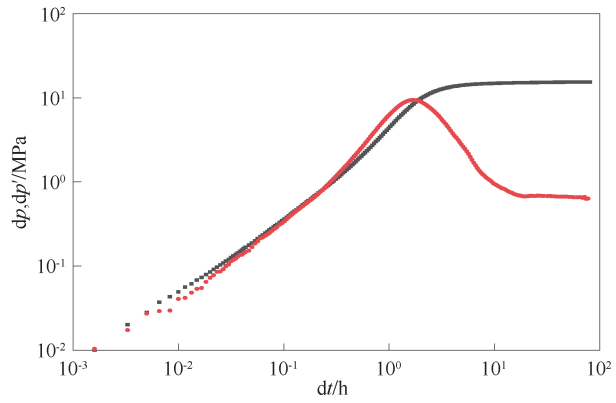


图 12 H26 井 C1-1 层关井压力及其导数双对数图
Fig.12 Logarithmic diagram of closing pressure and derivative of C1-1 formation in Well H26

表 3 压裂措施选层技术应用效果表
Table 3 Application effect of layer selection technology for fracturing measures

井号	井段/m	曲线类型	流动单元图版区域	措施建议	地层产量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)			措施建议与实际试油结果符合性
					压前	压后		
L13X	1 443.4 ~ 1 456.6	C	压裂有效	压裂	油 0.02	油 7.84 水 0.74		符合
S108	2 351.0 ~ 2 366.0	B	压裂有效	压裂	液 0.02	油 4.05 水 2.67		符合
H26	1 835.8 ~ 1 883.4	A	/	压裂	油 1.21	油 13.63		符合
L17X	2 033.6 ~ 2 068.2	C	压裂有效	压裂	液 0.10	油 4.14		符合
L9-1	1 480.0 ~ 1 496.4	A	/	压裂	油 0.09 水 0.63	水 14.40		符合
L15X1	1 303.2 ~ 1 307.0	B	压裂有效	压裂	油 0.08	油 1.35 水 5.58		符合
L101	1 231.0 ~ 1 237.0	C	压裂有效	压裂	油 0.01	油 1.62 水 1.59		符合
B77	2 120.0 ~ 2 132.0	B	压裂有效	压裂	油 3.15	油 41.16		符合
B76	1 534.0 ~ 1 548.8	C	压裂有效	压裂	油 0.07	油 7.14		符合
B48-103	811.0 ~ 819.0	C	压裂无效	不压	油 0.10	油 0.17		符合
L18	1 878.0 ~ 1 884.0	B	压裂无效	不压	油 0.12	油 0.25		符合

4 结论

(1)通过压裂效果与动态资料、静态资料的相关性分析确定三者之间存在着错综复杂的关系,在进行措施选层时,应充分考虑动、静资料双重约束下的综合决策方法。

(2)形成了压裂选层决策方法——流动单元法,并确定了选层原则,能够将静态参数与动态资料有机结合起来,实现了定性及半定量两个层次的压裂措施选层。

(3)2018 年在二连油田应用 11 井层,压裂有效率提高了 32%。

(4)研究表明,该方法操作简单、判别准确率高,能够为优选压裂层位和优化压裂方案提供技术支持。

致谢:在论文写作期间,刘述忍博士以及油气井测试分公司评价解释中心的解释人员给予了指导,在此表示感谢。

参考文献

[1] 肖芳淳. 压裂酸化中选井选层的模糊物元评价分析[J]. 石油钻采工艺, 1996, 18(6): 49-53, 59.
XIAO Fangchun. Fuzzy matter-element evaluation method for choosing oil wells and reservoir fracturing and acidizing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1996, 18(6): 49-53, 59.

[2] 蒋廷学. 重复压裂选井选层的模糊识别方法[J]. 石油钻采工艺, 1997, 19(3): 60-62, 80.
JIANG Tingxue. A fuzzy method for selecting well and formation in refracturing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1997, 19(3): 60-62, 80.

[3] 付永强, 郭建春, 赵金洲, 等. 多层次模糊聚类在压裂酸化选井选层中的应用[J]. 天然气工业, 2001, 21(5): 58-60.
FU Yongqiang, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou, et al. Application of multi-level fuzzy cluster to well and layer choice for fracturing and acidizing [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(5): 58-60.

[4] 郭建春, 吴建发, 赵金洲. 压裂酸化选井的人工神经网络

- 络软件研制[J]. 天然气工业, 2004, 24(11): 67-69.
- GUO Jianchun, WU Jianfa, ZHAO Jinzhou. Development of artificial nerve network softwares of well-selection for fracture acidizing [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(11): 67-69.
- [5] 梁冲, 蒋卫东, 程维恒, 等. 阿姆河右岸不同类型储层改造配套技术研究与应用[J]. 钻采工艺, 2014, 37(3): 58-62.
- LIANG Chong, JIANG Weidong, CHEN Weiheng, et al. Research and application of acid fracturing matching technologies suited for different carbonate reservoir in Amudarya Right Bank [J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(3): 58-62.
- [6] 杨小涛, 张鹏, 徐克彬, 等. 乌兰花潜山火成岩储层压裂技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(6): 39-45.
- YANG Xiaotao, ZHANG Peng, XU Kebin, et al. Fracturing technology for Wulanhua buried hill igneous rock reservoir [J]. Well Testing, 2018, 27(6): 39-45.
- [7] 吴亚红, 李秀生, 钟大康, 等. 人工神经网络在压裂选井及选层中的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(5): 42-44.
- WU Yahong, LI Xiusheng, ZHONG Dakang, et al. Application of the artificial nerve networks to the target selection of hydraulic fracturing [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2001, 25(5): 42-44.
- [8] 刘洪, 赵金洲, 胡永全, 等. 模糊神经网络系统在优选压裂井层中的应用[J]. 钻采工艺, 2002, 25(5): 34-37.
- LIU Hong, ZHAO Jinzhou, HU Yongquan, et al. Application of the fuzzy neural network system in the selection of wells or layers for fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(5): 34-37.
- [9] 杜卫平. 重复压裂选井选层人工神经网络方法[J]. 钻采工艺, 2003, 26(4): 106-107, 109.
- DU Weiping. Artificial neural network method for repeated fracturing well selection and layer selection [J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(4): 106-107, 109.
- [10] 刘长印, 孔令飞, 张国英, 等. 人工智能系统在压裂选井选层方面的应用[J]. 钻采工艺, 2003, 26(1): 37-38.
- LIU Changyin, KONG Lingfei, ZHANG Guoying, et al. Application of artificial intelligence system in selection of well and layer for fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2003, 26(1): 37-38.
- [11] REEVES S R, BAKER F. A review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phytoremediation of metal-polluted soils [J]. Phytoremediation of Contaminated Soil and Water, 1976, 26(3): 85-107.
- [12] OBERWINKLER C, MICHAEL J E. The definitive identification of candidate wells for refracturing [C]. SPE 84211, 1998.
- [13] ROBERT F S. Artificial neural networks identify restimulation candidates in the Red Oak Field [C]. SPE 52190, 1999.
- [14] MOHAGHEGH S, REEVES S R, HILL D. Development of an intelligent systems approach for restimulation candidate selection [C]. SPE 59767, 2000.
- [15] MOHAGHEGH S. Applications of virtual intelligence to petroleum engineering [J]. Computers and Geosciences, 2000, 26(8): 67-74.
- [16] 王发现, 张松革, 高萍, 等. 试井资料在压裂选层中的作用[J]. 油气井测试, 2005, 14(3): 21-22, 24.
- WANG Faxian, ZHANG Songge, GAO Ping, et al. Application of Testing data for selecting Layer in Fracture [J]. Well Testing, 2005, 14(3): 21-22, 24.
- [17] 王广林, 王秋爱, 郭丽, 等. 应用压力导数曲线优化压裂选层[J]. 油气井测试, 2011, 20(3): 23-24.
- WANG Guanglin, WANG Qiu'ai, GUO Li, et al. Applying pressure derivative curve to optimize the selecting fractured layer [J]. Well Testing, 2011, 20(3): 23-24.
- [18] 李琳琳, 刘述忍, 李拥军, 等. 基于试井数据的低流度储层增产措施选层方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(27): 172-177.
- LI Linlin, LIU Shuren, LI Yongjun, et al. Stimulation layer candidate selection method based on well-testing data for low mobility reservoir [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(27): 172-177.
- [19] 张程恩, 潘保芝, 刘倩茹. 储层品质因子 RQI 结合聚类算法进行储层分类评价研究[J]. 国外测井技术, 2012, 33(4): 11-13.
- ZHANG Cheng'en, PAN Baozhi, LIU Qianru. Reservoir classification evaluation research with combination of reservoir quality factor RQI and clustering algorithm [J]. World Well Logging Technology, 2012, 33(4): 11-13.
- [20] 陈欢庆, 胡永乐, 闫林, 等. 储层流动单元研究进展[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 875-884.
- CHEN Huanqing, HU Yongle, YAN Lin, et al. Advances in the study of reservoir flow unit [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(6): 875-884.

编辑 王 军

第一作者简介: 徐凤兰, 女, 1983 年出生, 硕士, 高级工程师, 2015 年毕业于中国石油大学(北京)地质工程专业, 目前主要从事油气藏试井评价工作。电话: 0317-2551573, 15903161963; Email: 443574953@qq.com。通信地址: 河北省廊坊市广阳区万庄石油渤海钻探油气井测试分公司评价解释中心, 邮政编码: 065007。