

利用地层测试资料指导低渗透砂岩储层压裂改造选层

王鑫鑫¹, 霍丽丽², 张辉³, 李琳琳⁴, 胡涛⁴, 徐凤兰⁴

- 1. 中国石油吉林油田公司勘探部 吉林松原 138000
- 2. 中国石油冀东油田分公司勘探开发研究院 河北唐山 063000
- 3. 中国石油华北油田公司勘探事业部 河北任丘 062552
- 4. 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;xufenglan@cnpc.com.cn

项目支持:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项课题“华北油田持续有效稳产钻完井关键技术研究与应用”(2017E-1511)

引用:王鑫鑫,霍丽丽,张辉,等. 利用地层测试资料指导低渗透砂岩储层压裂改造选层[J]. 油气井测试,2020,29(5):54-60.

Cite: WANG Xinxin, HUO Lili, ZHANG Hui, et al. Application of formation test data to guide fracturing candidate for low-permeability sandstone reservoirs [J]. Well Testing, 2020,29(5):54-60.

摘要 为了提高低渗透砂岩储层压裂改造效果和节省费用支出,有必要在压裂前进行措施选层。收集了近百口低渗透砂岩储层压裂措施井压前地层测试资料,采用统计分析技术,提出了针对此类储层的压裂选层方法。该方法通过总结压前地层测试资料与压裂效果优劣的相关规律性,按照压裂效果从优到劣将地层测试曲线分为七大类型,并形成指导压裂选层的标准图版,同时针对不同类型指定对应的选层标准和原则,使用时仅依据目标井压前测试资料特征,就可以对其是否具备措施潜力做出预判性决策,2019 年在二连油田乌兰花凹陷储层成功应用 4 井层,措施选层准确率 100%。应用结果表明,该方法能够实现对所有低渗透砂岩储层压裂效果的有效预测,简单实用、可靠,通用性强。

关键词 低渗透砂岩储层;压裂改造;选层;地层测试;双对数曲线;径向流

中图分类号:TE353 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.05.010

Application of formation test data to guide fracturing candidate for low-permeability sandstone reservoirs

WANG Xinxin¹, HUO Lili², ZHANG Hui³, LI Linlin⁴, HU Tao⁴, XU Fenglan⁴

- 1. Exploration Department, PetroChina Jilin Oilfield Company, Songyuan, Jilin 138001, China
- 2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063000, China
- 3. Exploration Department, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062552, China
- 4. Well Testing Branch, CNPC Bohai Drilling and Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: In order to improve the fracturing effect of low-permeability sandstone reservoir and save costs, the formation test data of nearly 100 fractured wells before fracturing in low-permeability sandstone reservoir are collected, and the fracturing layer selection method for low-permeability sandstone reservoir is proposed by using statistical analysis technology. By summarizing the correlation between pre-fracturing formation test data and fracturing effect, the formation test curve is divided into seven types according to the fracturing effect from good to bad, and a standard chart is formed to guide fracturing layer selection. For different types, the corresponding selection criteria and principles are specified. In addition, according to the characteristics of the pre-fracturing test data of the target well, the predictive decision is made on whether it has the potential of fracturing. In 2019, this method was successfully applied for 4 wells/layers in Wulanhua sag of Erlian Oilfield, and the accuracy rate of layer selection was 100%. This method has a good guidance for effective prediction of fracturing effect of all low-permeability sandstone reservoirs.

Keywords: Low-permeability sandstone reservoir; fracturing; layer selection; formation test data; double logarithmic curve; radial flow; fracturing effect

对油气井进行压裂改造措施前,为了保证压裂改造措施的效果和节省投入支出,有必要对需要改造的储层进行选层预测^[1]。而目前,相较于钻井、录井和测井资料,反映储层较大范围内渗流特征的地层

测试实测曲线及双对数综合曲线是指导压裂前选层、对压裂效果有效预测的行之有效的办法之一^[2]。

王镜惠等^[3]针对煤层气酸化压裂选层问题,采用了煤样碳酸岩含量测试和酸液浸泡前后渗透率实验,研究了酸液对煤样渗透率的影响规律,得出了酸化压裂选层原则:储层碳酸盐含量大于1%,黏土矿物含量低于2%,含气量大于 $16\text{ m}^3/\text{t}$,储层渗透率为 $0.1\sim 0.2\text{ mD}$ 。但该研究仅考虑了酸化对改善煤层气储层的影响。张雁雁等^[4]针对低渗透油田的水力压裂选层问题,采用统计分析方法,研究了影响压裂效果的参数,得出了压裂选层方法。但需要已知地质参数多,该方法可操作性差。詹耀华等^[6]针对重复压裂资料少或者未进行重复压裂区块的选井选层问题,应用数理统计和模糊数学理论相结合的方法,建立了致密气藏重复压裂选井选层评价算法,确定了苏里格气田重复压裂井选取标准。尤玉婷^[6]针对重复压裂的选井选层问题,采用对重复压裂的分析技术,研究了重复压裂效果影响因素,得出了重复压裂的选井选层具体方法,免在油井开采过程中浪费更多的人力、物力。徐凤兰等^[7]针对二连探区压裂选层问题,采用效果影响因素分析方法,建立压裂目标区域流动单元图版,得出了可定性、半定量压裂选层原则和方法。但是,该技术需要了解整个区域几十口井以上的压裂措施资料,并且只是适用于二连油田,通用性差。陈凯等^[8]针对海上低渗油田存在压裂经验及资料数据欠缺而无法进行压裂选井选层需要的问题,采用类比方法,根据陆地低渗油田的压裂经验,总结了压裂选井选层的主要影响因素,然后应用于海上某一低渗油田,最终筛选出的井层压裂预测效果较好,可为海上低渗油田压裂选井选层提供指导与借鉴。该方法将陆上油田压裂经验应用于海上油田,在压裂选井影响因素上未进行重新分析,易低估了海上油田压裂可行性。沈澈等^[9]针对致密砂岩储层压裂油井的快速选井选层问题,采用最大值标准化法和层次分析法,研究了产出剖面测井参数确定各类压后储层的采油强度,指导研究区油井压裂选层,以及压裂效果的评价,取得了较好的应用效果。毛纯^[10]针对苏里格盒8气藏低渗致密气藏储层重复压裂选井选层问题,采用灰色关联度方法和扩展有限元理论,建立了生产诱导应力模拟模型,确定了该储层理想重复压裂井。蒋艳芳^[11]针对鄂北气田杭锦旗含水气藏、大牛地老区压裂改造优选压裂

层问题,采用统计分类方法,分析了中途测试资料在压裂选层中的应用情况,得出污染严重的井,适合进行小规模解堵压裂;测试期间产水量较大的井、下部储层含水而无法有效控水的井、压力亏空较大的井,不适合进行压裂改造。杨玉才^[12]针对Q油田缝网压裂井选层问题,通过产液剖面测试数据进行分析,评价各类型压后产液情况,最终确定低孔特低渗透储层缝网压裂选层标准,指导大庆外围油田低孔特低渗透储层缝网压裂选层,有效指导该类储层的缝网压裂改造。黎铨等^[13]针对赛东洼槽低孔隙度、低渗透性储层压裂选层问题,采用该区三十余口井录井资料的统计分析,研究了油气产能与储集层特征的关系,最终建立了该地区碎屑岩储集层压裂录井参数标准。但由于受录井探测范围较小限制,该方法准确性较差。唐秀娟^[14]针对如何提高压裂效果问题,从提高区块产量和稳油控水两个方面进行了研究,得出提高压裂效果方法。师斌^[15]通过开展小井距条件小聚驱开发压裂时机研究,给出了压裂选井选层条件,确定了合理的措施时机。党海龙等^[16]针对Q油田大批次的井需要压裂和重复压裂,依据应用层次分析法(AHP),依据多口压裂井的效果与压裂参数间关系,建立起了适合Q油田的压裂选层模型,给出了选层方法,并对候选层段进行了优劣排序,定量判断合适的压裂层段。冯笑含^[17]针对辽河油田A区块非常规储层压裂选层方式问题,采用多重分形的方法研究了岩石的复杂程度与压后产能的规律性,得出了该区块脆性矿物含量丰富,复杂程度及不均性最强,储层矿物分布复杂,适合进行体积压裂改造。刘冲等^[18]针对河南温县太原—山西组泥页岩压裂层段优选问题,综合物性、含气性和可压性指标,优选出较好的泥页岩小层,通过一口井的实际应用,确定出两层适合措施,四层为备选压裂层。

本文根据吉林、二连、冀东等油田压前地层测试资料300余层,结合各种实测曲线及双对数曲线与压裂效果优劣的相关性的统计分析,总体反映储层特征层次分明,不同区块差别较大,储层物性横纵向变化大,不同类型的储层对应不同的压裂效果等特点,因此,根据地层测试与压裂效果的关系,将地层测试曲线按照压裂效果的优劣顺序分为七大类型。针对不同类型,形成了对应的选层标准和原则。通过二连油田实例井的现场应用表明,该选层标准及原则简单,可靠且实用,能够很好地提高压裂成功率。

1 地层测试原理及反映的储层特征

地层测试的原理是利用钻杆或油管将测试工具(测试阀、封隔器、压力计等)送入井下预定深度,后坐封封隔器,通过地面控制打开测试阀,造成井筒与地层之间有一个较大的压差,地层中的流体在压差作用下流到井筒内。通过地面操作可进行多次井下开关井,不但获得产层的液性和产量,同时也能获取在开井流动及关井恢复状态下压力随时间变化的形态特征曲线。对该曲线进行现代解释方法分析,可计算出反映产层特性的地层参数^[19-20]。

不同的实测静流压曲线代表着不同的储层渗流特征:开井期间,曲线上升速率越快,储层的导流能力越强,储层越有一定的产量;反之,储层渗流能力弱,储层产量低甚至无产出。关井压力恢复曲线恢复速率越快,达到稳定的时间越早,说明储层的导压能力越强,地层能量充足,如图 1 中的①、②、④曲线;反之,压力恢复速率缓慢,曲线呈现缓慢“爬坡”状态,说明地层能量差,储层导压能力弱,如图 1 中的③曲线。

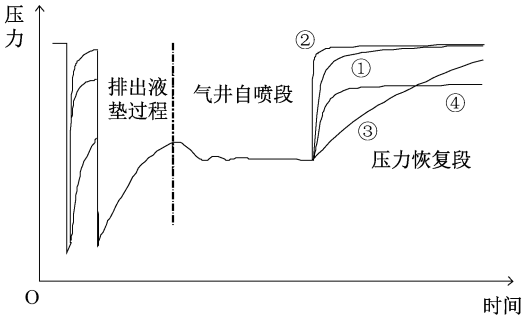


图 1 实测时间-压力历史曲线图
Fig. 1 Historical graph of measured pressure

若开井流压曲线平直,关井压力曲线呈现直角状态,则说明储层受到严重污染,对应于双对数综合曲线中,导数曲线峰值高,两条曲线开口大。一次关井末点压力与二次关井末点压力比较,看储层压力是否出现衰竭现象:若二关恢复末点压力大于等于一关末点压力,则储层不存在衰竭现象;反之,则地层出现能量衰竭现象,这样的储层压裂后增产是有限的。如图 2 所示,双对数综合曲线中,第 I 段为井筒储集效应段,双对数与导数合拢在一起,呈 45°直线,斜率为 1.0;第 II 段为过渡段,导数曲线出现峰值后向下倾斜,表皮系数值越大峰值越高,相应导数与双对数曲线在径向流段的开口距离越大,代表储层污染越严重;第 III 段为径向流段,导数曲线的特征为水平线;第 IV 段为外边界反映段,a 线为不渗透边界特征反映,b 线为恒压边界特征反映。

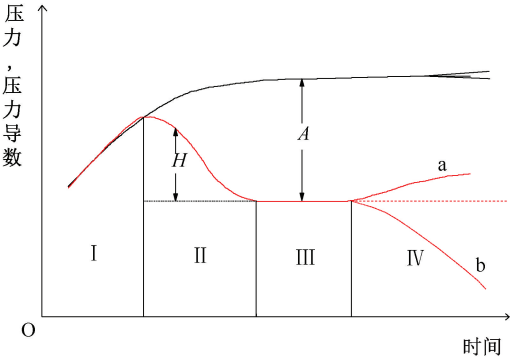


图 2 压力及其导数双对数曲线综合图
Fig. 2 Double logarithmic curves of pressure and its derivative

2 压前测试曲线统计分析

地层测试实测压力曲线及对应的双对数曲线能够灵敏地反映储层渗流能力的优劣,可通过大量低渗透砂岩储层压前地层测试资料的归类统计分析。从压裂效果的优劣与地层测试实测曲线及双对数曲线的对应关系,将产出较少的低渗透储层划分为七大类型(表 1)。其中四种类型曲线(图 3 中 I-III 类)进行压裂后取得了非常好的效果,它们表现的共同特征是:二关压力恢复速度快,双对数-导数曲线续流时间短,并且开口的幅度大(对数周期值高),进入径向流段的时间早;一种曲线类型(图 3 中 IV 类)压裂改造后效果良好,地层测试资料表现为:压力恢复能力较好,压前测试地层有少量油产出,双对数诊断曲线有一定开口幅度;三种类型曲线形态(图 3 中 V-VII 类)压裂后表现为效果差或者无增产效果,这些曲线表现为经过二开流动后,二关压力上升缓慢,且明显低于一关压力,双对数诊断图曲线续流段长,两条曲线重合或者导数曲线在双对数曲线之上,无后期双对数综合曲线特征,或者后期曲线上翘明显,说明这类油藏范围含油性较差,流动过程中产出极少或者无产出,进行压裂后效果差或者基本无效。

表 1 压裂效果与地层测试资料关系统计表
Table 1 Statistical table of relationship between fracturing effect and formation test data

效果	类型
优	I 类:恢复能力强,双对数曲线径向流明显,开口幅度大
	II 类:导压能力强,污染严重,双对数曲线开口幅度大
	III 类:恢复能力强,双对数曲线开口幅度小,后期有边界反映
良好	IV 类:有一定恢复能力,未达到径向流动段
差或无效	V 类:二关压力衰竭,曲线上翘
	VI 类:压力恢复缓慢,续流段长,或导数曲线位于双对数曲线之上
	VII 类:开关井为一条平直线,导数与双对数曲线完全重合

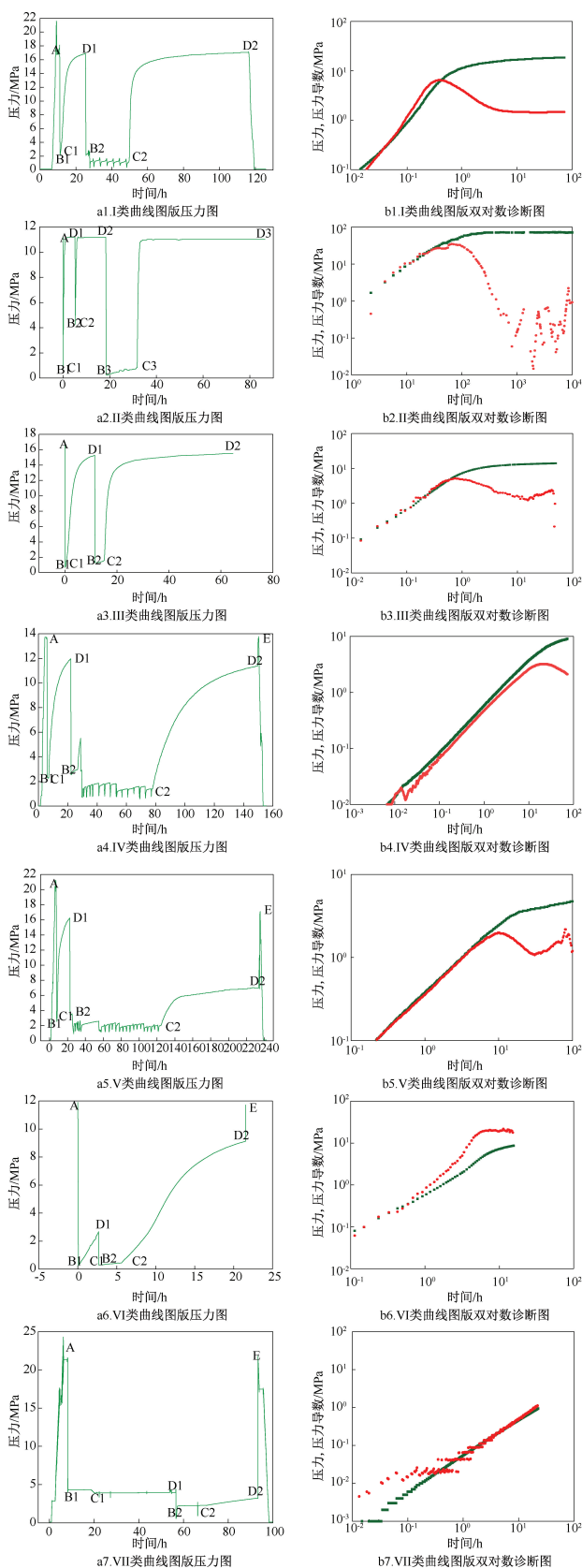


图3 压裂选层决策的七种类型图版

3 储层压裂选层标准及原则

应用低渗透砂岩储层压前地层测试曲线与压裂效果的对应关系图版,能够增加低渗透砂岩储层进行压裂改造措施效果预测的准确度,但为了更好地指导后期的压裂改造,将上述图版应用方法进行提炼、排序,形成了低渗透砂岩储层压裂改造前选层的标准及原则:

(1) 储层应具有足够的油气贮存量和能量,经过二开二关井之后,二关压力恢复快,对双对数曲线上具有明显径向流动段并且曲线开口幅度较大产油量低的低渗透层,要做为首选压裂选层目标。

(2) 实测压力曲线呈“厂”字形,双对数曲线开口幅度大,即 $C_D e^{2S}$ 值大的井层,表明油层受到严重污染的井,进行压裂改造解堵后,增产效果非常明显。

(3) 油气显示较好,综合解释为油层、差油层的储层,在较大生产压差下无产出或产出量很小,但其压力恢复能力较好的低渗透层,建议进行压裂。

(4) 油层厚度大,因岩石颗粒不均导致孔渗条件较差的低渗透砾岩层,在其压力恢复能力较好的条件下,压裂措施后增产效果明显,压裂产生的裂缝可有效的沟通离井筒一定距离的物性较好的渗透带,也建议进行压裂改造措施。

(5) 在压裂层与水层间的夹层较薄时,有与水层相遇的接触面,在位于裂缝可能通过的方向时,会被击穿而与水层沟通。遇此情况不宜压裂,或者压前测试产水多、产油少的储层,不宜进行压裂。

(6) 经压裂前测试,由初、终两次关井压力对比,二关恢复压力明显衰竭的油气层,不宜进行压裂。

(7) 压前测试产出极少或无流体产出,压力恢复极慢的致密层,不具备压裂条件,即使近井地层压开裂缝,由于地层自身缺乏能量,不建议压裂。

4 应用效果

将低渗透砂岩储层压裂选层标准及原则在二连油田乌兰花凹陷低渗透砂岩储层进行应用,形成的图版类型基本涵盖了该油田所有的储层渗流模式,可以实现准确预测储层是否适合压裂。

4.1 压裂见效储层

A 井 K1b1 段,对应井层 2 029.40~2 052.00 m,岩性为油斑、油浸细砂岩,电测解释为差油层,油层,2020 年对其进行了 MFE 测试射孔联作施工,测试结果为油干层(表 2),获得的实测压力历史曲线

Fig. 3 Diagram of the relationship between seven types of formation test data

(图 4a)和双对数诊断曲线(图 4b)与 I 类曲线图版相似(图 3a1、3b1),符合第一条选层标准及原则,建议对该层优选进行压裂改造措施。

表 2 A 井 41-44 号层压裂前、后测试成果对比表
Table 2 Comparison table of test results before and after fracturing in layer 41-44 of Well A

项目	压前	压后	项目	压前	压后
油产量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	0.05	40.03	裂缝半长/ m	/	75.1
地层压力/ MPa	17.34	18.85	探测半径/ m	2.2	183.6
压力系数	0.94	1.02	表皮系数	8.83	-5.55
渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	0.01	3.53	导流能力/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$)	/	236.32

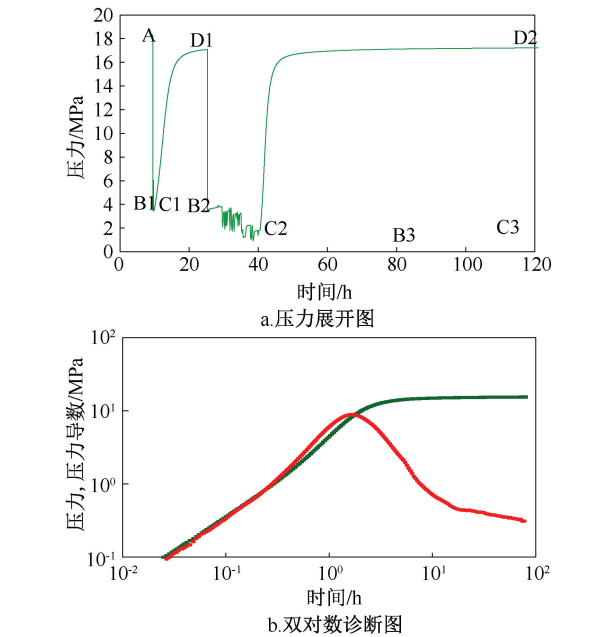


图 4 A 井压前测试相关曲线图
Fig. 4 Correlation curve before fracturing in Well A

2020 年 6 月进行了压裂施工,入地层静液量 512.99 m^3 ,加砂 64.4 m^3 ,压后获得日产 40.03 m^3 的高产工业油流,对应的双对数诊断曲线显示裂缝特征明显(图 5),计算裂缝半长为 75.1 m,导流能力 236.32 $\text{mD} \cdot \text{m}$,探测半径从 2.2 m 扩大至 183.6 m,说明压裂效果明显。

B 井 1 853.0~1 895.0 m 井段(4 层厚 7.6 m),电测解释为油层、致密层,压力系数 0.93,压前地层测试结果为油干层。实测压力曲线反映(图 6a),两次开井期间抽汲产量不稳定,多次出现抽空现象,储层导流能力差,持续供液能力较弱,但二次关井曲线早期恢复较快,很快压力趋于稳定,说明储层导压能力强,双对数诊断曲线反映两条曲线开口大(图 6b),为典型的高污染特征,与 II 类曲线图版相

态一致,是进行压裂改造增产的潜力层。2020 年 9 月对该层进行了压裂改造,入地层静液量 211.31 m^3 ,加砂 30.39 m^3 ,压后获得日产 3.68 m^3 的工业油流,压裂见效。

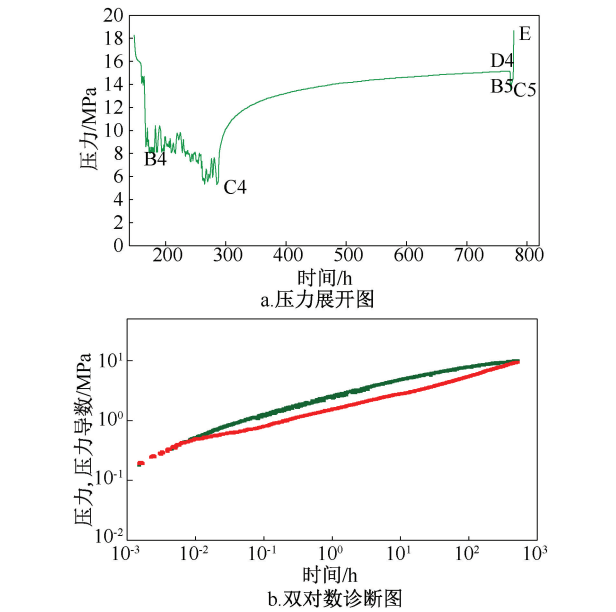


图 5 B 井压后测试相关曲线图
Fig. 5 Correlation curve after fracturing in Well B

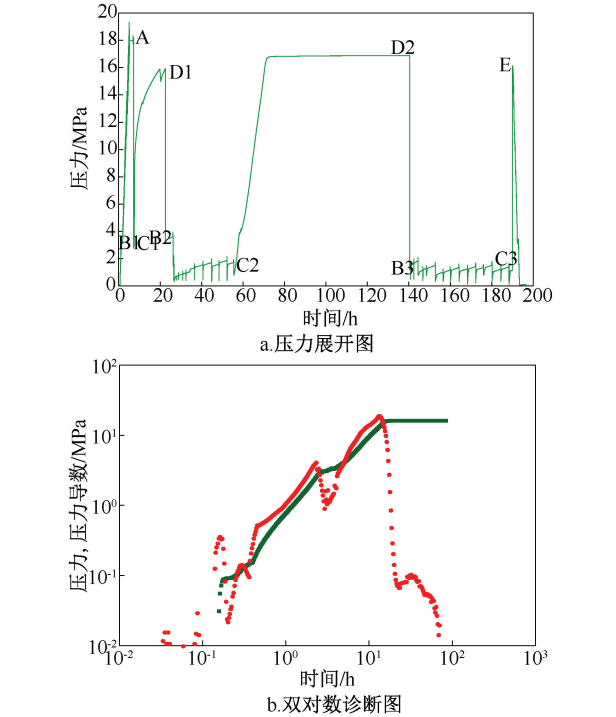


图 6 B 井测试相关曲线图
Fig. 6 Correlation curve for testing in Well B

4.2 压力衰竭储层

对 C 井 2 369.00~2 399.40 m(5 层厚 7.4 m,电测解释为油层、差油层)井段进行了地层测试。地

层渗透率 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 压力系数 0.72。测试期间地面显示即使进行抽汲作业, 产出液量仍然极少, 测试结论为油干层。虽然双对数诊断曲线出现径向流特征(图 7b), 原状地层发育天然裂缝, 但实测压力曲线反映储层存在压裂衰竭现象(图 7a): 二关末点压力 12.69 MPa, 比初关末点压力降低了 3.98 MPa, 属于图 3 中 V 类图版曲线。此类井进行压裂难以见效, 即使见效, 产量递减速度较大, 难以稳产。2020 年 7 月进行了压裂改造措施, 入地层静液量 395.14 m^3 , 加砂 48.69 m^3 , 压后见油花, 试油结论仍为油干层, 压裂无效。

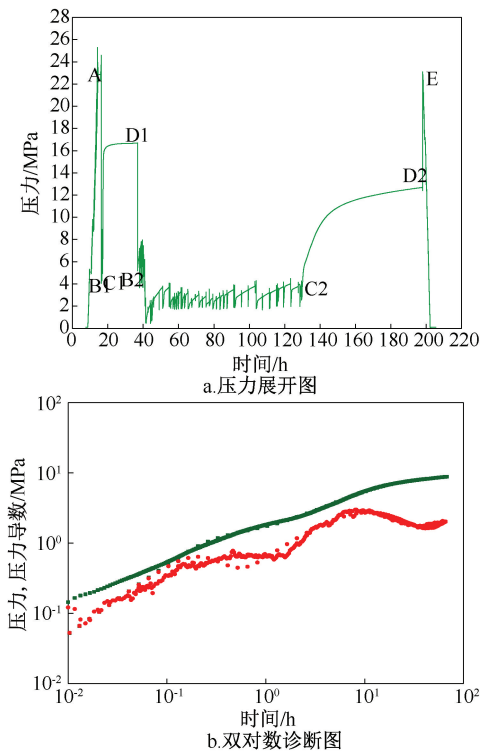


图 7 C 井测试相关曲线图
Fig. 7 Correlation curve for testing in Well C

4.3 压力恢复缓慢储层

2020 年 5 月对 D 井 1 320.6~1 348.0 m(5 层厚 7.4 m, 电测解释为差油层、干层) 井段进行 MFE 测试射孔、抽汲排液联作测试, 地层渗透率 $0.005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 压力系数 0.99。实测压力曲线反映(图 8a), 储层渗流、压力传导能力均极差。双对数诊断图显示(图 8b), 导数曲线超覆于压力曲线之上, 无径向流动段, 地层参数计算结果显示为特低渗, 无污染储层, 符合图 3 中 VI 类图版曲线, 不建议进行压裂改造措施。2020 年 7 月仍然采用压裂措施进行了储层改造, 入地层静液量 206.66 m^3 , 加砂 31.25 m^3 , 压后见油沫, 储层仍然为干层特征, 压裂无效。

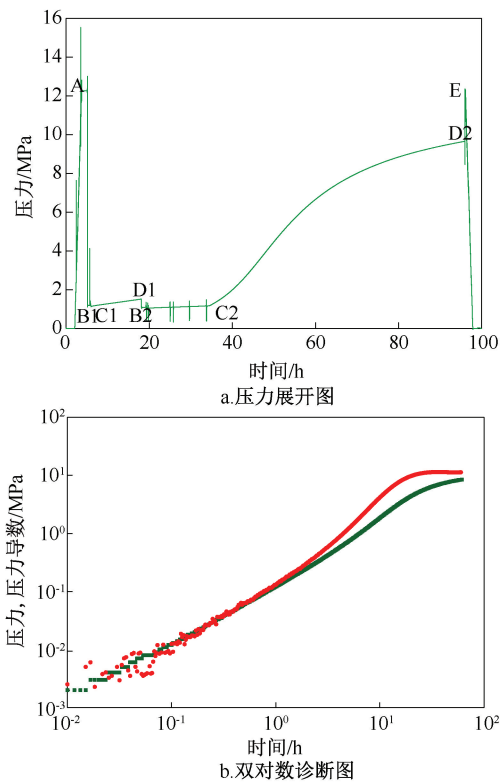


图 8 D 井测试相关曲线图
Fig. 8 Correlation curve for testing in Well D

5 结论

- (1) 利用地层测试资料能有效指导低渗透砂岩储层压裂措施选层问题。二连油田现场应用结果表明, 该方法可提高低渗透砂岩储层压裂改造效果, 节省费用支出, 简单实用、可靠, 通用性强。
 - (2) 该方法适用于低渗透砂岩储层的压裂选层, 需要压前地层测试资料。若其它岩性应用此方法, 需重新研究压裂效果与储层关系。
 - (3) 压裂选井选层工作复杂、综合性强, 实现了压裂选层的定性预判, 但无法定量预测。今后应进一步加强压裂效果与压前地层参数的定量关系研究, 形成不同增油量下的多种压裂方案的优选方法。
- 致谢: 感谢华北油田二连油田分公司对本篇文章提供的技术支持。

参考文献

[1] 王晓冬, 张义堂, 刘慈群. 垂直裂缝井产能及导流能力优化研究[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(6): 78-81.
WANG Xiaodong, ZHANG Yitang, LIU Cijun. Productivity evaluation and conductivity optimization for vertically fractured wells [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 78-81.

[2] 李会影. 利用试井解释成果优选压裂井及效果评价[J]. 科技博览, 2012(15): 238.

- LI Huiying. Optimization of fracturing well by well test interpretation results and its effect evaluation [J]. China Science and Technology Review, 2012(15):238.
- [3] 王镜惠,梅明华,刘娟,等. 煤储层酸化增渗影响因素及酸化压裂选井原则[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(5): 12-14, 26.
- WANG Jinghui, MEI Minghua, LIU Juan, et al. Coal reservoir acidification permeability enhancing impact factors and acidification fracturing well selection principle [J]. Coal Geology of China, 2020, 32(5): 12-14, 26.
- [4] 张雁雁,王海霞. 压裂选井选层方法及其与应用[J]. 化学工程与装备, 2020(4): 75-76.
- ZHANG Yanyan, WANG Haixia. Method of well and layer selection in fracturing and its application [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(4): 75-76.
- [5] 詹耀华,鲁明晶,毕曼,等. 基于多因素关联体系的重重复压裂选井选层方法研究及应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 78-81.
- ZHAN Yaohua, LU Mingjing, BI Man, et al. Research and application of re-fracturing candidate selection method based on multi factor association system [J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 78-81.
- [6] 尤玉婷. 重复压裂的选井选层方法及压裂效果影响因素分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(4): 7-8.
- YOU Yuting. Method of well selection and layer selection for repeated fracturing and analysis of influencing factors on fracturing effect [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(4): 7-8.
- [7] 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, 28(5): 67-73.
- 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, 28(5): 67-73.
- [8] 陈凯,姚为英,匡腊梅,等. 海上低渗油田压裂选井选层影响因素及实例研究[J]. 石油化工应用, 2019, 38(8): 46-49.
- CHEN Kai, YAO Weiyang, KUANG Lamei, et al. The influence factors and case studies of wells and layers selection for low permeability offshore oilfields fracturing [J]. Petrochemical Industry Application, 2019, 38(8): 46-49.
- [9] 沈澈,牛广侠,宋子学. LX地区F油层致密砂岩储层压裂选层及效果评价方法研究[J]. 国外测井技术, 2019, 40(4): 55-59.
- SHEN Che, NIU Guangxia, SONG Zixue. Study on fracturing layer selection and effect evaluation method of F oil layer dense sandstone reservoir in LX area [J]. World Well Logging Technology, 2019, 40(4): 55-59.
- [10] 毛纯. 苏里格盒8气藏重复压裂技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- MAO Chun. Study of refracturing technology for the Shihezi foration 8, Sulige gas reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [11] 蒋艳芳. 中途测试资料在压裂选层中的应用——以鄂北气田为例[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2019, 21(1): 59-62.
- JIANG Yanfang. Application of drill-stem testing data in fracturing selection: Taking Ebei gas field as an example [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2019, 21(1): 59-62.
- [12] 杨玉才. Q油田缝网压裂选层标准研究[J]. 化学工程与装备, 2019(2): 70-71.
- YANG Yucai. Study on fracture network fracturing layer selection standard in Q Oilfield [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(2): 70-71.
- [13] 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 elastic rock reservoir in Saidong trough [J]. Mud Logging Engineering, 2018, 29(4): 13-19.
- [14] 唐秀娟. 提高压裂效果方法的研究[J]. 石化技术, 2018, 25(11): 43.
- TANG Xiujian. Study on improving the method of fracturing effect [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(11): 43.
- [15] 师斌. 小井距条件下聚驱开发压裂时机研究[J]. 石化技术, 2018, 25(10): 122.
- SHI Bin. Development of fracturing timing of polymer flooding under conditions of small well spacing [J]. Petrochemical Industry Technology, 2018, 25(10): 122.
- [16] 党海龙,崔鹏兴,刘双双,等. 低渗透油藏压裂选层方法研究及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(4): 1082-1088.
- DANG Hailong, CUI Pengxing, LIU Shuangshuang, et al. Study and application of fracturing layer selection method in low permeability reservoir [J]. System Engineering Theory and Practice, 2018, 38(4): 1082-1088.
- [17] 冯笑含. 基于多重分形的岩石矿物分布规律研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(8): 109-110.
- FENG Xiaohan. Study on the distribution of rock minerals based on multifractal theory [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2018, 38(8): 109-110.
- [18] 刘冲,袁青松,董果果,等. ZXY1井太原—山西组泥页岩压裂层段优选[J]. 中外能源, 2018, 23(3): 32-38.
- LIU Chong, YUAN Qingsong, DONG Guoguo, et al. Optimization of fractured shale layer in Taiyuan-Shanxi formation in Well ZXY1 [J]. Sino-Global Energy, 2018, 23(3): 32-38.
- [19] 林加恩. 油气井试井资料的价值及作用[J]. 油气井测试, 2016, 25(4): 38-40, 43.
- LIN Jia'en. Value and function of oil & gas well testing data [J]. Well Testing, 2016, 25(4): 38-40, 43.
- [20] 张英魁. 低渗透油藏注水井压力降落试井早期资料解释新方法[J]. 油气井测试, 2017, 26(6): 22-25.
- A new method of pressure descent test curve analysis of low permeability oil reservoir injection well [J]. Well Testing, 2017, 26(6): 22-25.

编辑 刘振庆

第一作者简介:王鑫鑫,男,1982年出生,工程师,2005年毕业于大庆石油学院石油工程专业,主要从事试油、测试工作。电话:0317-2551573, 13843867192; Email: wangxinx@petrochina.com.cn。通信地址:吉林省松原市宁江区沿江东路1219号,邮政编码:138000。