

地层破裂压力测井解释技术在 LG 地区的应用

齐宝权 谢刚 张树东 文泽军 刘子平

川庆钻探工程公司测井公司

齐宝权等. 地层破裂压力测井解释技术在 LG 地区的应用. 天然气工业, 2009, 29(10): 38-41.

摘要 确定地层破裂压力和水力压裂裂缝延伸几何形态, 对于设计合理的压裂方案、提供合理的压裂施工压力、避免压裂裂缝高度过高导致地层间的层间窜漏、更好地达到改善储层的目的至关重要。针对 LG 地区碳酸盐岩气藏特点, 介绍了用测井资料预测地层破裂压力和裂缝高度的基本原理和方法, 并选择 LG 地区 5 口井的测井资料进行了地层破裂压力和裂缝高度预测处理。结果表明: LG 地区地层破裂压力测井计算方法和裂缝高度预测方法合理, 为 LG 地区碳酸盐岩储层改造提供的施工参数较为可靠; 在 LG 地区某井长兴组综合运用地层破裂压力和裂缝高度预测结果优选了试油层位, 获得了日产百万立方米的高产天然气, 取得了较大的经济效益和较好的应用效果。

关键词 四川盆地 碳酸盐岩 储集层 改造 地层破裂压力 裂缝高度 测井 计算

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.10.011

1 LG 地区碳酸盐岩储层的基本特征

LG 地区碳酸盐岩储层非均质性较强, 储渗空间形态各异, 大小悬殊, 分布不均, 同一套储层内部纵向上储层类型均有较大变化, 油气储集空间多为裂缝—孔洞型。对于这类碳酸盐岩储层, 储层内部岩石破裂压力变化较大, 而裂缝越发育, 地层破裂压力越低, 这就要求针对裂缝性储层进行压裂施工作业时, 要特别注意压力的控制, 以免引起底水上窜。因此, 准确把握岩石的破裂压力对于优化压裂施工参数, 提高压裂效果至关重要。针对 LG 地区礁滩碳酸盐岩气藏的地质和工程特点, 开发了利用测井资料计算地层破裂压力、优化压裂参数的方法, 选择该地区 5 口井资料作了处理, 为改造该地区碳酸盐岩储层提供了重要的施工参数, 并为 LG 地区某井长兴组获得日产 $120.57 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产天然气提供了强有力的技术支撑, 取得了较大的经济效益和较好的应用效果。

1.1 储层的岩性特征

LG 地区位于四川省境内, 地面为一个较平缓的北西向不规则穹隆背斜。LG 地区飞仙关组储层岩性主要为溶孔云岩、灰质云岩和石灰岩; 长兴组生物礁发育, 处于礁主体的礁滩储层主要分布于近长兴组顶部, 岩性纯, 岩性主要为白云岩和灰质云岩, 见

裂缝和溶蚀孔洞, 处于礁前和礁后的储层主要发育于长兴组的中下部, 岩性包括石灰岩、灰质云岩、云质灰岩。

1.2 储层物性特征

LG 地区飞仙关组储层以孔洞为主, 部分层段发育裂缝, 储层类型主要为孔隙型、裂缝—孔隙型, 孔隙度主要分布在 $2\% \sim 18\%$, 渗透率介于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。长兴组储层孔隙度相对较低, 裂缝相对发育, 部分层段发育非均匀分布的溶洞, 孔隙度主要分布在 $2\% \sim 10\%$, 渗透率介于 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层类型主要为裂缝—孔隙型, 其次为孔洞型。

2 基本原理

2.1 地层破裂压力预测基本原理

利用测井资料进行地层破裂压力预测, 首先必须求出地层的弹性模量和地层及井眼周围的应力分布。井眼的形成打破了原地应力的平衡状态, 应力在井眼周围岩石中重新分布, 引起应力集中, 井内压力过高时地层将被压开, 使其原有的裂缝更加张开延伸或形成新的裂缝, 此时井内的泥浆柱静压力称为地层的破裂压力。地层破裂压力的大小与地应力大小、地层强度和孔隙、裂缝的发育程度密切相关。从力学角度说, 当井壁地层所受的拉应力超过地层

抗拉强度时,地层将发生破裂。井壁上的应力状态对压裂的结果起着决定性的作用。

起始压裂的压力(地层破裂压力)函数为:

$$p_f = 3S_x - S_y - \alpha p_p + T$$

式中: p_f 为起始压裂的压力; p_p 为地层孔隙压力, α 为 Biot 弹性常数; T 为岩石抗张强度; S_x 为最小水平应力; S_y 为最大水平应力。

p_p 可以通过试油资料测量或用声波资料求出^[1], α 和 T 可通过岩石力学实验测量, S_x 和 S_y 的计算方法见文献[2]、[3]。

地层初始压裂后,连续泵入压裂液将导致裂缝沿着平行于最大应力和垂直于最小应力的平面延伸。这种连续性压裂的压力将低于再压裂的压力,但应大于最小水平应力。

2.2 地层裂缝高度预测的基本原理

2.2.1 裂缝高度

当在井筒内增加压力时,将会在与最小主应力(S_x)方向相垂直的平面上出现破裂裂缝。诱导这一裂缝所需要的压力称为破裂压力,一旦裂缝已经压开,保持裂缝开口所需要的压力(在垂直裂缝的情况下)将等于最小水平应力,这一应力就是通常所说的闭合应力。在构造缓冲区,最小主应力通常是水平的,因此裂缝将沿着垂直面产生。在压裂过程中,压裂液产生张力,在纵向压裂的情况下,其压力与地层的水平压应力相抵消。如果地层的顶部或底部的应力强度因子(K)超过地层的断裂韧度,则预计裂缝将沿纵向延伸。因此,预测裂缝是否沿纵向延伸取决于裂缝上下地层的应力强度因子。

在计算中,主要的变量是裂缝高度、裂缝中的流体压力及最小水平应力的大小。最小水平应力的大小随深度(Z)的变化而变化。

2.2.2 裂缝高度延伸的强度因子计算^[4]

裂缝高度延伸的强度因子计算式为:

$$K_{top} = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \int_{-h}^h [S_y(z) - p_w] \sqrt{\frac{h-z}{h+z}} dz$$

$$K_{bot} = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \int_{-h}^h [S_y(z) - p_w] \sqrt{\frac{h-z}{h+z}} dz$$

式中: K_{top} 、 K_{bot} 分别为裂缝顶部和底部的应力强度因子; 裂缝高度 $2h$ 指垂直于最小水平应力的距离。

2.2.3 岩石韧度(K_{lc})的计算^[4]

岩石韧度的计算为:

$$K_{lc} = \frac{(S'_x + T_s)^2}{10^4 E} \sqrt{\pi h}$$

其中: $S'_x = p_w (1 - \alpha)$

$$T_s = \frac{0.025E}{CB} [0.008VCL + 0.0045 \times (1 - VCL)] \times 1.4494 \times 10^4$$

如果忽略裂缝中的摩擦损失,假定流体压力等于井眼流体压力,那么确定垂直裂缝是否延伸就变成计算 K_{top} 和 K_{bot} 的值及确定在何处起超过 K_{lc} 的问题。如果地层的顶部或底部的应力强度因子超过地层的断裂韧度,则裂缝将沿纵向延伸,否则不延伸。不管在何深度都是如此。裂缝的每次延伸都必须重新计算应力强度因子。

3 地层破裂压力预测在 LG 地区的应用

根据测井资料及有关参数处理了 LG 地区 5 口井的资料,求出了地层破裂压力、裂缝高度的有关数据,并绘制了裂缝高度延伸图。

3.1 地层破裂压力预测

岩石力学性质包括岩石的弹性模量和岩石强度。用地层破裂压力预测软件计算的弹性模量和岩石强度是动态的,与岩石的静态力学性质之间有一定的差别,需要用实验室数据将动态弹性模量和强度转换成静态数据。利用破裂压力软件计算了该区飞仙关组和长兴组的地层弹性参数,具体数据见表 1。

表 1 岩石力学参数统计表

井号	杨氏模量(GPa)	泊松比	破裂压力(MPa)
LGX	73.4	0.29	122.1
LGY	74.0	0.31	122.4
LGZ	78.7	0.30	100.0

可见地层破裂压力曲线随着岩性的变化而变化。地层破裂压力值越高,地层越难以压开,越易成为阻碍裂缝延伸的障碍带;破裂压力值越低,地层越容易破裂,裂缝也容易延伸。

对测井资料预测的破裂压力与实际施工的参数进行了对比,发现两者有较好的一致性。LGX 井酸压井段 6 055~6 124 m,其酸压施工的实际破裂压力值为 127.4 MPa,而计算的破裂压力值为 122.1 MPa,误差为 4%。LGY 井酸压井段 5 953.00~5 990.00 m,破裂压力测量值为 128.6 MPa,而计算的破裂压力值为 122.4 MPa,误差为 2%。LGZ 井飞仙关组射孔井段 4 781.00~4 812.00 m,该段地层破裂压力测量值为 97 MPa,计算值为 100 MPa,误差为 2%。

总之,对比 LG 地区测井预测破裂压力与实测破裂压力值,误差小于 5%,说明 LG 地区测井预测的地层破裂压力是比较准确的,为该地区酸化压裂改造提供了可靠的施工参数。

3.2 裂缝高度预测

根据地层破裂压力预测输出的有关参数,计算出顶部和底部应力强度因子。从射孔井段开始,上、下逐点比较应力强度因子和岩石韧度的大小,确定在不同的压力增量情况下,裂缝的延伸及裂缝高度。若应力强度因子大于岩石韧度,裂缝延伸,否则不延伸。裂缝高度椭圆图是根据软件输出的数据绘制而成的。

图 1 是 LG 地区 A 井裂缝高度预测图,可以看出:当压力增量为 1 MPa 时,形成高度为 8 m 的压裂缝,压裂缝延伸井段为 5 794~5 804 m;当压力增量超过 1.0 MPa 时,压裂缝继续略有延伸。用 A 井套前、套后交叉偶极横波测井资料检测^[5]了其裂缝高度(图 2),可以看出:压裂前,5 794~5 804 m 各向异性不明显,压裂后,该井段呈现一定的各向异性,由此判断压裂缝井段为 5 794~5 804 m,缝高为 8 m,

表明该井实际的水力压裂裂缝井段为 5 794~5 804 m,与预测结果一致。

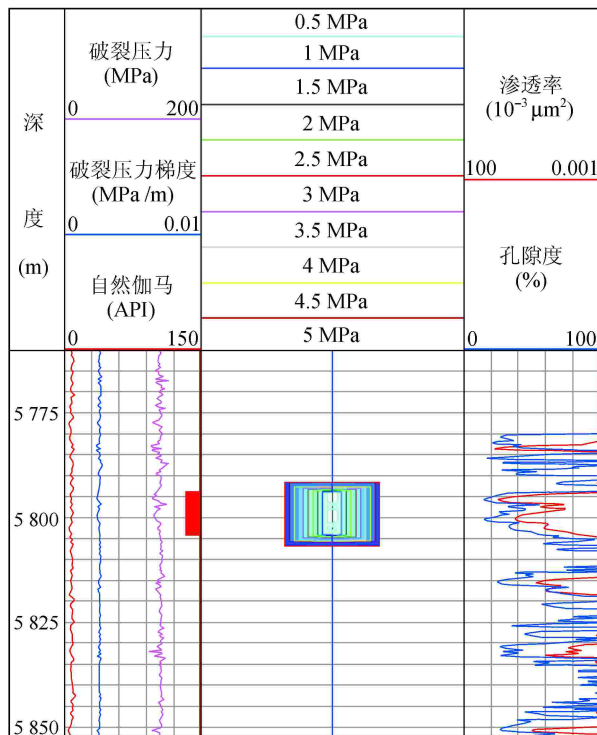


图 1 A 井飞仙关组裂缝高度预测图

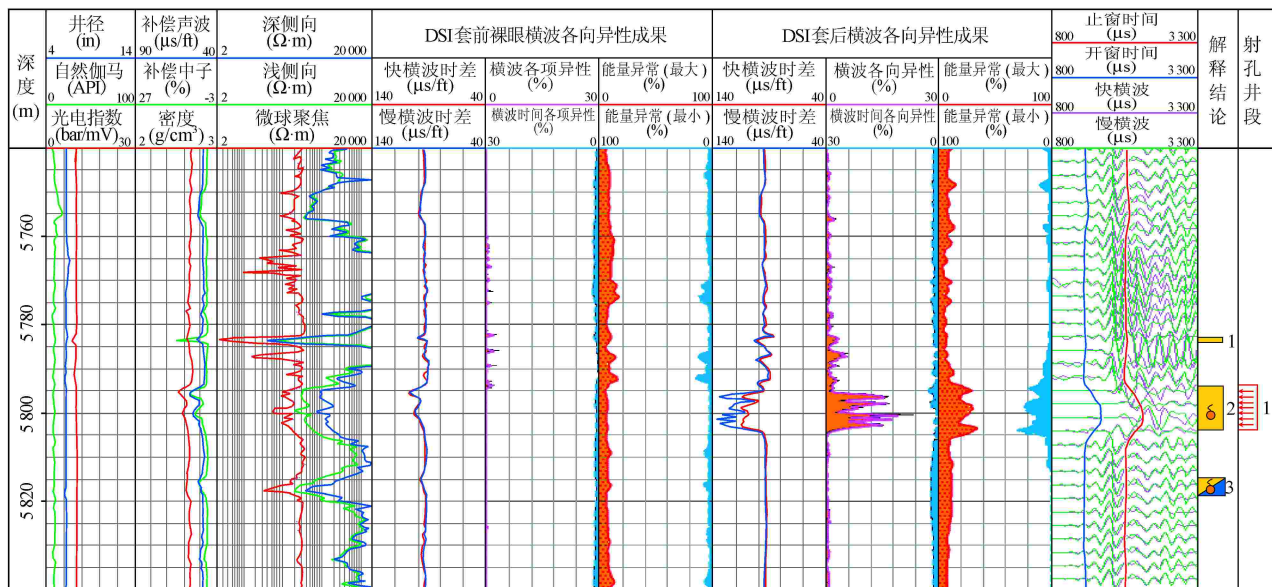


图 2 A 井飞仙关组裂缝高度检测图

3.3 综合运用地层破裂压力和裂缝高度预测结果优选试油层位

用测井资料计算了 LG 地区井长兴组的地应力和破裂压力大小(图 3),地应力平均在 60 MPa 左右,地层破裂压力平均在 125 MPa 左右。而该层段解释了 6 个储层(图 3),包括 1 个含气层(8[#]),3 个

气层(9[#]、10[#]、11[#]),1 个气水同层(12[#])和 1 个水层(13[#])。为了避免压开水层,通常的做法是打开 8[#]、9[#]、10[#] 储层,能否进一步打开长兴组厚度为 5.8 m 的 11[#] 储层是这次分析的重点,因为 11[#] 储层下面相隔不远即是水层。为此利用测井资料对 B 井长兴组各储层段的地层破裂压力和水力压裂缝延伸

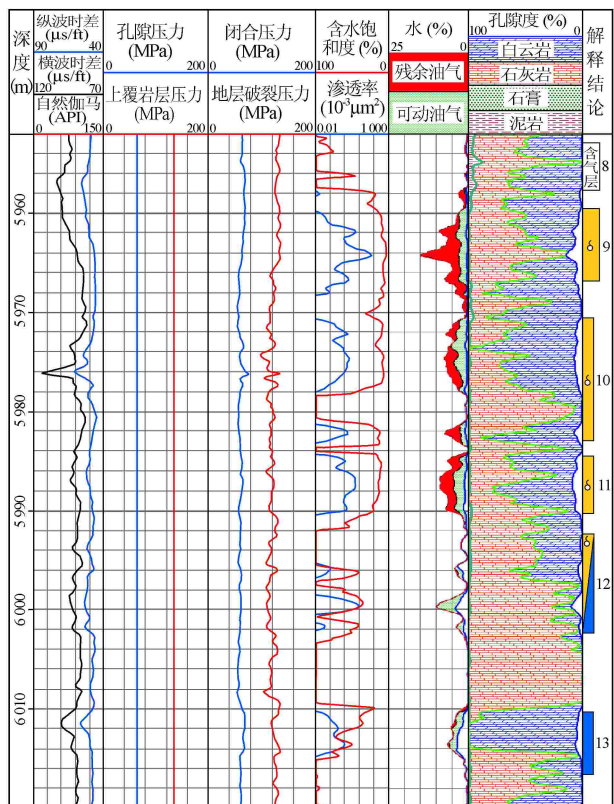


图3 B井破裂压力处理成果图

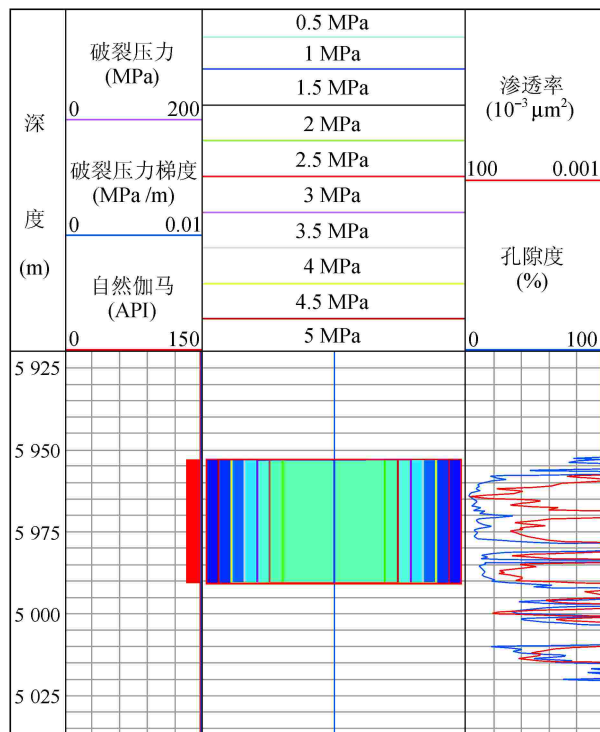


图4 B井裂缝高度预测图

情况(图4)做了精细评价工作。分析后认为,如果同时射开4个气层(8[#]~11[#]),地层首先从中部10[#]层压开,然后再向上下延伸,而11[#]和12[#]储层之间有破裂压力障碍带,且无天然裂缝和钻井诱导缝沟通,如果控制好泵压,水力压裂缝不会延伸到下面水层。甲方采纳了该建议,最终该井测试获日产120.57×10⁴ m³天然气,无水。该成果为B井成为该地区长兴组产量最高的一口井提供了强有力的技术支撑,取得了较好的应用效果。

4 结论

1) 地层破裂压力与地层孔隙压力、最大水平应力、最小水平应力和地层的力学性质以及岩石成分密切相关。

2) 综合运用地层破裂压力和裂缝高度测井解释技术可为优选试油层位提供依据。

参 考 文 献

- [1] 瓦尔特 H 费特.异常地层压力[M].宋秀珍,译.北京:石油工业出版社,1982.
- [2] 谢刚.用测井资料计算最小和最大水平应力剖面的新方法[J].测井技术,2005,29(1):82-89.
- [3] 李金柱,李双林.岩石力学参数的计算及应用[J].测井技术,2003,27(增刊):15-18.
- [4] 江万哲,章成广,黄文新.用测井资料预测压裂裂缝高度的方法研究[J].测井技术,2007,31(5):479-481.
- [5] 赵继文,汪浩,原镜海,等.综述交叉偶极子阵列声波测井技术测量地层横波各向异性[J].国外测井技术,2001,16(6):7-14.

(收稿日期 2009-08-13 编辑 韩晓渝)