

文章编号: 1006-6616 (2017) 03-0467-08

# 地应力分层技术在压裂设计优化中的应用

张美玲<sup>1</sup>, 董传雷<sup>1</sup>, 蔺建华<sup>2</sup>

(1. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;

2. 大庆钻探测井公司, 黑龙江 大庆 163412)

**摘要:** 纵向连续地应力分布对井中储层的压裂施工设计具有重要的指导意义。以卫星油田葡萄油藏储层为研究对象, 结合实际储层压裂数据, 优化建立由连续测井数据计算地层最小主应力的数学模型, 给出合理的沿井轴连续的地应力剖面。以自然电位曲线的分层为基准, 按照一定规则将应力剖面曲线、自然伽马曲线分层取值, 并计算待压裂层与上(下)隔层间的“隔层厚度”、“储隔层应力差”、“隔层品质”等参数。利用研究区实际压裂设计数据, 以避免压裂过程中待压裂岩层发生“窜槽”为目的, 研究给出了不同参数岩层, 在压裂排量、压砂强度、单位厚度用量及压裂方式等施工参数方面的约束条件。实际井例的应用说明, 这些条件可有效保障勘探开发压裂工艺的成功率。

**关键词:** 地应力; 压裂; 分层技术; 测井资料; 窜槽; 卫星油田

**中图分类号:** P315.727

**文献标识码:** A

## 0 引言

地应力是地球固体介质受重力、多种地球构造力等在地球内部引起的响应变形的力学参数<sup>[1-3]</sup>, 直接影响着固体介质及其蕴含的各种流体的力学行为, 已广泛应用于油田开发工程中<sup>[4-6]</sup>。水力压裂法、应力恢复法、应力解除法等是获取地应力数据较为直接的测试手段, 理论上它比其他方法有更高的精度, 但却存在测量数据有限、地应力剖面不连续、成本高等问题。研究表明, 利用井中测量的纵横波速度、岩层密度、岩层孔渗特征等信息, 可以计算出连续的地应力剖面<sup>[7-8]</sup>。声波成像测井资料已被广泛用于计算地层水平主应力<sup>[9-12]</sup>。以成像测井资料测量的横波传播速度为基础, 采用优化技术构建横波波速<sup>[13]</sup>, 以此实现地层最小水平应力连续剖面的计算<sup>[14]</sup>; 可以实现常规测井资料计算连续地应力剖面。

有效的油层施工压裂前, 应进行合理的施工压裂设计, 压裂过程中压裂排量、支撑剂及压裂

液的优选及用量都与压裂效果密切相关<sup>[15]</sup>。实际压裂过程中所造成的裂缝高度大于待压裂层的高度, 造成上窜(与待压层上部岩层沟通)或下窜(与待压层下部沟通)的“窜槽”情况, 不仅造成成本增大、而且容易造成上部(或下部)水层中的水产出, 极大地降低了采油效率。

目前压裂施工优化设计一般都是在目的层地应力计算基础上, 采用压裂设计软件给出压裂施工设计参数。李军指出在已知岩层地应力基础上, 可以依据邻近目的层之间的地应力差距确定分层或合层压裂方式<sup>[16]</sup>。董建华、郭大力等在已知某一岩层的最小水平地应力值后, 采用全三维软件从理论角度给出该层诸如施工排量、裂缝高度等参数的压裂施工设计, 以防止压裂时压窜目的层上部或下部水层<sup>[17-18]</sup>。刘钦节等针对薄互低渗油藏地质特点, 建立地应力计算模型, 并采用全三维数值软件探讨了岩层地应力与压裂缝形态的影响规律<sup>[19]</sup>。

但实际压裂生产中, 仍会出现压裂窜槽等现象, 原因在于全三维压裂优化软件建立在相对理

收稿日期: 2016-12-23

基金项目: 中国国家自然科学基金项目(41274132)

作者简介: 张美玲(1967-), 女, 教授, 博士, 主要从事地球物理测井理论及资料解释评价方法方面的研究。E-mail: zhangmeiling8@163.com

想的岩层模型基础上,针对众多的输入参数,给出众多的输出设计参数。这对于压裂层较厚且性质较均匀、隔层厚且为纯泥质层的情况可以给出较合理的压裂设计,而对于卫星油田葡 I 油层组这类目的层较薄、油水分布复杂且泥隔层粉砂含量较高的情况下,存在一定的多解性。因此有必要结合实际压裂井的压裂效果,在最小水平主应力曲线分层基础上,系统考察压裂岩层与隔层应力差、泥隔层厚度、泥隔层品质对岩层压裂窜槽现象的限制作用,来作为压裂理论设计的有效补充。

## 1 地应力计算模型

在地下岩体中存在着三个在方向上相互垂直的主地应力,即由岩体自重引起的垂直地应力、最大和最小水平应力。岩层的压裂效果往往与最小水平应力密切相关<sup>[15]</sup>。由于地下岩层构造都存在方向性,最小水平应力计算模型采用公式(1)<sup>[7-8]</sup>:

$$\sigma_h = \left( \frac{\nu}{1-\nu} + B \right) (\sigma_v - \Phi P_p) + \Phi P_p \quad (1)$$

式中,  $\sigma_h$  为最小水平应力, MPa。  $\sigma_v$  为垂直地应力, MPa; 它是由上覆地层的重力引起的, 可通过对地层密度沿深度的积分计算给出<sup>[5]</sup>, 见公式(2)

$$\sigma_v = \int_0^h \rho(h) \cdot g \cdot dh \quad (2)$$

式中,  $h$  为地层埋藏深度, m;  $\rho(h)$  为地层密度随地层深度变化的函数,  $g/cm^3$ , 实际计算时取为补偿密度测量值;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ ;

公式(1)中其它参数的定义分别如下:

$B$  为地质构造应力系数,反映了构造应力对水平地应力的影响。施工压裂曲线的瞬时停泵压力数据相当于岩层产生裂缝后的闭合压力,即岩层的最小水平应力<sup>[20]</sup>。在实际计算时,选取研究区单压裂层(共计24层),从压裂测试曲线上读取岩层压裂后的闭合压力(已校正到地下压力),作为最小水平应力代入公式(1)中,采用一维优化搜索技术,确定  $B = 0.209$ , 一维搜索区间为(0, 1),以相对均方根误差  $< 5\%$  为搜索截止误差。24层计算的最小水平应力与实测闭合压力平均相对误差 3.19%。

$\nu$  为岩石泊松比,采用公式(3)计算

$$\nu = \frac{0.5\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_c^2} \quad (3)$$

其中,  $\Delta t_c$ 、 $\Delta t_s$  为纵、横波时差,  $\mu s/ft$ , 纵波时差可

由补偿声波测量值提供,横波时差可以在优化 Gristensen 公式系数基础上,由补偿声波测量值和补偿密度测量值计算给出<sup>[13]</sup>。

$P_p$  为地层孔隙压力, MPa, 采用声波时差法确定<sup>[21]</sup>, 见公式(4):

$$P_p = \sigma_v - (\sigma_v - P_w) \left( \frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^U \quad (4)$$

其中,  $P_w$  为正常地层孔隙压力, MPa, 取静水柱的压力;  $\Delta t$  为计算点实测补偿声波时差值,  $\frac{\mu s}{ft}$ ;  $\sigma_v$  为垂直地应力, 由公式(2)计算;  $\Delta t_n$  为计算点对应的正常趋势线上的声波时差值,  $\frac{\mu s}{ft}$ ;  $U$  由研究区单测试层地层孔隙压力数据得到, 本文取为 2.46。

$\Phi$  为地层孔隙压力贡献系数, 由公式(5)确定

$$\Phi = 1 - \frac{\rho(h)(3/\Delta t_c^2 - 4/\Delta t_s^2)}{\rho_m(3/\Delta t_{ca}^2 - 4/\Delta t_{sa}^2)} \quad (5)$$

其中,  $\rho_m$ 、 $\Delta t_{ca}$ 、 $\Delta t_{sa}$  分别为致密骨架的密度和纵、横波时差, 考虑到研究区为砂泥岩沉积地层, 取致密砂岩  $\rho_m = 2.65 g/cm^3$ ;  $\Delta t_{ca} = 101.5 \mu s/ft$ ;  $\Delta t_{sa} = 51.2 \mu s/ft$ 。

## 2 地应力分层技术及相关参数定义

### 2.1 曲线分层技术

岩层层序界面变化反应敏感的测井曲线为自然电位、自然伽马曲线<sup>[22-23]</sup>, 在岩性层序界面上自然电位曲线发生突变, 突变点落在曲线的半幅点上<sup>[24]</sup>, 将自然电位曲线为基准曲线进行分层, 在此分层基础上针对其他曲线进行取值。常规测井曲线的分层取值方法较为成熟, 考虑到地应力计算过程中应用到补偿密度、补偿声波时差、横波时差等测井曲线, 应力曲线的取值按照厚度几何平均的方式<sup>[25]</sup>。图1为研究区卫1-#7井应力计算及以自然电位曲线为基准曲线的分层取值结果, 1236 m ~ 1260 m 井段共分7层, 包括3个储层和4个隔层。其中 1239.4 m ~ 1240 m、1242.6 m ~ 1244.2 m、1247.4 m ~ 1254.8 m 分别为葡 I4、葡 I5、葡 I6 储层。

### 2.2 相关参数定义

定义三个有效应力分层参数。“储隔层应力差”参数  $\sigma$  定义为“上部邻泥岩层最小水平应力

与射孔层最小水平应力之间的差值”, 或“下部邻泥岩层最小水平应力与射孔层最小水平应力之间的差值”。“隔层厚度”参数  $h$  定义为“射孔层上边界与该岩层之上邻近砂岩体下边界之间的距离”, 或“射孔层下边界与该岩层之下邻近砂岩体上边界”。“泥岩品质”参数  $\xi$  定义为“岩层相对于纯泥岩的变化值”。令  $dgr$  为自然伽马测量值相对于纯泥岩的变化值, 小数;  $dmr$  为相对于纯泥岩的微电极幅度差变化量, 小数; 可由公式 (6) 计算<sup>[24]</sup>

$$dgr = (gr - gr_{min}) / (gr_{max} - gr_{min})$$

$$dmr = rmn_{sh} / rmn \quad (6)$$

当岩层不含放射性元素, 自然伽马曲线不出现异常高值时,  $\xi$  取为  $dgr$ , 否则取为  $dgr$  与  $dmr$  的最小

值。式中,  $gr_{max}$  为纯泥岩自然伽马值, 单位 API;  $gr_{min}$  为纯砂岩自然伽马值, 单位 API;  $rmn_{sh}$  为稳定泥岩微电位电阻率值, 欧姆米;  $gr$  为岩层自然伽马读值, API;  $rmn$  为岩层微电位读值, 欧姆米。

针对图 1 中的葡 15 待压裂层, 当考虑岩层压裂是否会发生上窜时:  $\sigma$  参数取为 a 位置应力值 - b 位置应力值 = 21.15 ~ 18.35 MPa;  $h$  参数取为 a 位置自然电位曲线对应的层厚度;  $\xi$  参数由 a 位置的自然伽马测量值计算得出。若考虑岩层压裂是否会发生下窜时,  $\sigma$  参数取为 c 位置应力值 - b 位置应力值 = 21.25 ~ 18.35 MPa;  $h$  参数取为 c 位置自然电位曲线对应的层厚度;  $\xi$  参数由 c 位置的自然伽马测量值计算得出。

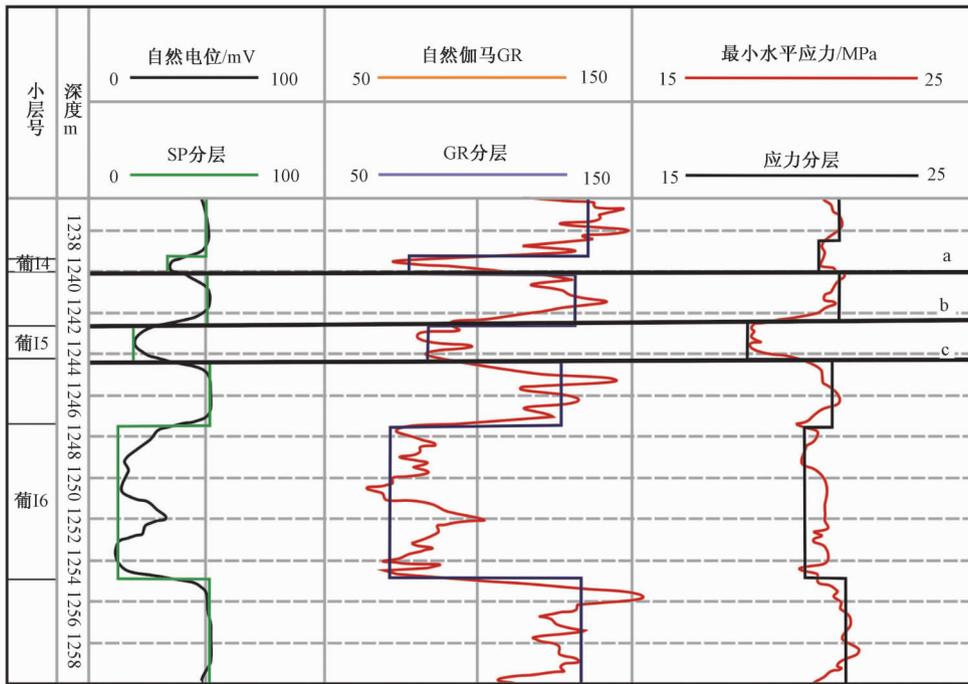


图 1 研究区卫 1-#7 井应力计算及其分层结果  
Fig. 1 Results of stress calculation and layering of wei 1-#7

### 3 有效应力分层参数在压裂设计中的应用

#### 3.1 油层压裂窜槽情况分析

在对薄油层或阻挡层为弱应力层的油层进行压裂时, 裂缝可能会穿透生产层进入上下盖底层中, 这样既达不到深穿透的目的, 同时也浪费大量的支撑剂和压裂液。通过分析可以看出: 对于砂泥岩储层, 隔层厚度、隔层应力差以及隔层品

质都不同程度对裂缝的的延伸起到遮挡作用, 尤其是, 最小水平主应力差异是控制裂缝垂向延伸的主要因素, 随着地应力差异变小, 隔层控制程度降低。

研究区自 2008 年实施压裂工作以来, 共压裂 49 口油井。压裂井中有 12 口窜槽井, 图 1 中卫 1-#7 井的葡 15 层为压裂层, 压裂后该井含水率由压前的 35.1%, 上升至 82.0%; 水分析矿化度为 11273.8 mg/L, 为典型的地层水特征<sup>[26]</sup>。分析认为压裂施工过程中, 将葡 16a 号水层压窜。葡 15

号层与葡 I6 号层隔层厚度  $h$  为 2.8 m; 两层间隔层应力差  $\sigma$  为 2.90 MPa; 泥岩品质  $\xi$  取值为 0.907。

因此, 有必要根据实际压裂井层数据的压裂施工效果, 开展应力分层数据对压裂施工设计的各项参数进行影响分析, 给出相应的限制条件。

### 3.2 各参数在压裂排量设计中的影响

利用已压裂层的隔层厚度、储隔层应力差建立关系(见图 2)。图 2 中有三个区域, 其中: 窜层区域 I, 条件为: 储隔层应力差  $< 3$  MPa 且隔层厚度  $< 2.8$  m, 或者, 储隔层应力差  $< 2.3$  MPa 且隔层厚度  $< 7.3$  m。非窜层区域 III, 储隔条件为: 储隔层应力差  $\geq 2$  MPa 或隔层厚度  $\geq 12.5$  m。其他区域为可能窜层区 II。

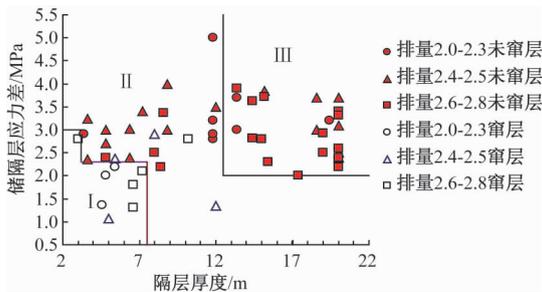


图 2 储隔层应力差~隔层厚度交会图

Fig. 2 Cross plot of interlayer stress difference and interlayer thickness

利用已压裂层的储隔层应力差、隔层品质参数建立关系(见图 3), 图中分为三个区域, 窜层区 I (当储隔层应力差  $< 2.1$  MPa 且隔层品质参数  $< 0.73$  时); 可能窜层区 II (当  $2.1$  MPa  $\leq$  储隔层应力差  $< 3.0$  MPa 且  $0.73 \leq$  隔层品质参数  $< 0.79$  时); 其余区域为非窜层区 III。

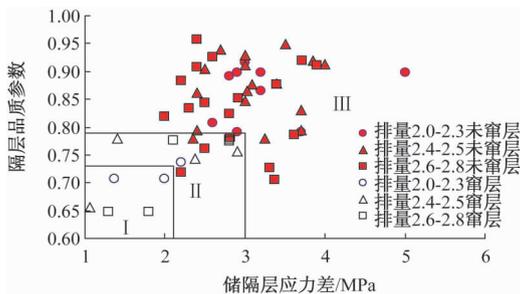


图 3 储隔层应力差~隔层品质参数交会图

Fig. 3 Cross plot of interlayer stress difference and interlayer quality parameters

依据图 2, 对于隔层厚度较小 ( $h < 2.8$  m)、储隔层应力差较小 ( $\sigma < 3$  MPa) 的层, 即使排量

较小, 在  $2.0 \sim 2.3$  m<sup>3</sup>/min 之间, 也容易出现窜层。对于落入“ $7.3 \text{ m} \leq h < 12.0 \text{ m}$ 、 $\sigma < 3$  MPa”区间的层, 在压裂排量较大 ( $2.4 \sim 2.5$  m<sup>3</sup>/min) 时, 容易产生窜层, 尤其是应力差较小  $\sigma < 1.5$  MPa, 即使隔层厚度达到 12 m, 也会被压窜。

依据图 3, 对于当  $\sigma < 3$  MPa 且  $\xi < 0.79$  时, 排量  $2.0 \sim 2.8$  m<sup>3</sup>/min 之间时, 极可能出现窜层; 尤其是  $\sigma < 2.1$  MPa 且  $\xi \leq 0.73$  的岩层。即使储隔层应力差为 2.9 MPa、隔层厚度达到 10.2 m 时, 在隔层品质参数略差 ( $\xi = 0.76$ ) 时, 高排量施工(排量  $2.6 \sim 2.8$  m<sup>3</sup>/min) 仍会造成窜层。

图 1 中的卫 1-#7 井的葡 I5 层与下隔层的应力差为 2.9 MPa, 下隔层厚度达到 3 m, 下隔层品质参数为 0.779; 但由于施工压裂过程中采取的较大的压裂排量 ( $2.6$  m<sup>3</sup>/min), 增大了造成窜槽的风险。

### 3.3 各参数在加砂强度设计中的影响

压砂强度为单位压裂厚度的用砂量, 定义为  $\gamma$ , m<sup>3</sup>/m。将各岩层压裂施工中的加砂强度与隔层厚度、隔层品质参数、隔层应力差建立关系图(见图 4)。从图中可以看出, 随着隔层厚度的增大、隔层品质变好、隔层应力差变大, 施工过程中的加砂强度可随之增大。由图 4, 针对  $\xi$ 、 $\sigma$ 、 $h$  三个参数, 当出现下面三种情况时, 待压裂层可能会出现压裂窜槽现象:

- 1) 隔层品质参数  $\xi$ , 当  $\gamma > 1.0929\xi + 2.8443$  且  $\xi < 0.783$  时;
- 2) 储隔层应力差  $\sigma$ , 当  $\sigma < 1.8$  且  $\gamma > 0.2476\sigma^2 - 0.3276\sigma + 3.6074$  时; 当  $\sigma \geq 1.8$  且  $\gamma > 5.2765\sigma^2 - 17.974\sigma + 19.109$  时;
- 3) 隔层厚度  $h$ , 当  $h < 7$  m 且  $\gamma > 0.0157h + 3.1$  时; 当  $h \geq 7$  m 且  $\gamma > 0.102h^2 - 1.305h + 7.357$  时。

图 1 中的卫 1-#7 井的葡 I5 层压裂施工中采用的压砂强度为 4 m<sup>3</sup>/m。该层与下隔层的应力差为 2.9 MPa, 计算的压砂强度上限为 11.36 m<sup>3</sup>/m。下隔层厚度达到 3 m, 计算的压砂强度上限为 3.1471 m<sup>3</sup>/m。下隔层品质参数为 0.779, 计算的压砂强度上限为 3.7 m<sup>3</sup>/m。而该层压裂施工时, 采用的压砂强度为 4 m<sup>3</sup>/m, 从下隔层品质及隔层厚度参数来看, 存在产生压裂窜槽的可能性。

### 3.4 各参数在单位厚度用量设计中的影响

$\eta$  为单位厚度用量, 单位 m<sup>3</sup>/m。图 5 为各岩层压裂施工中的单位厚度用量与隔层厚度、

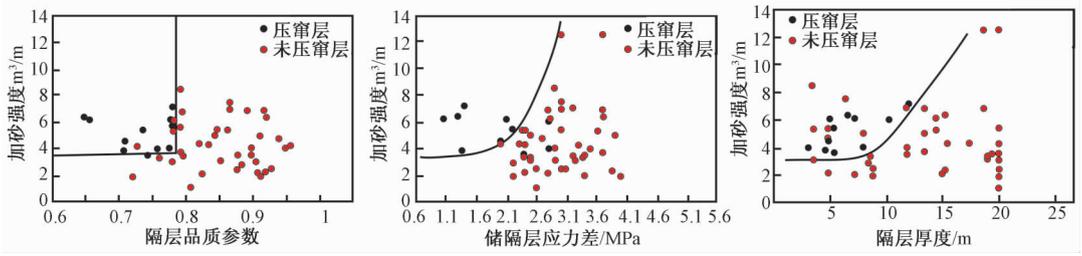


图 4 隔层品质、储隔层应力差、隔层厚度参数与加砂强度关系图

Fig. 4 Relation diagram respectively between sand filling intensity and interlayer quality, Reservoir interlayer stress difference and interlayer thickness parameters

隔层品质参数、隔层应力差关系图。从中可以看出, 随着隔层厚度的增大、隔层品质变好、隔层应力差变大, 施工过程中的用液量可以随着增大。相对三个参数以下三种情况存在压裂窜槽的可能:

1) 隔层品质参数  $\xi$ : 当  $\xi < 0.7$  且  $\eta > 10\xi + 14$  时; 且, 当  $\xi \geq 0.7$  且  $\eta > 2547.8\xi^2 - 3627.7\xi +$

1312.3 时;

2) 储隔层应力差  $\sigma$ : 当  $\eta > 4.0084\sigma + 15.095$  且  $\sigma < 2.9$  MPa 时;

3) 隔层厚度  $h$ : 当  $h < 8$  且  $\eta > 0.0167h^2 + 0.0619h + 21.15$  时; 且, 当  $h \geq 8$  且  $\eta > 0.3726h^2 - 5.8869h + 46.279$  时。

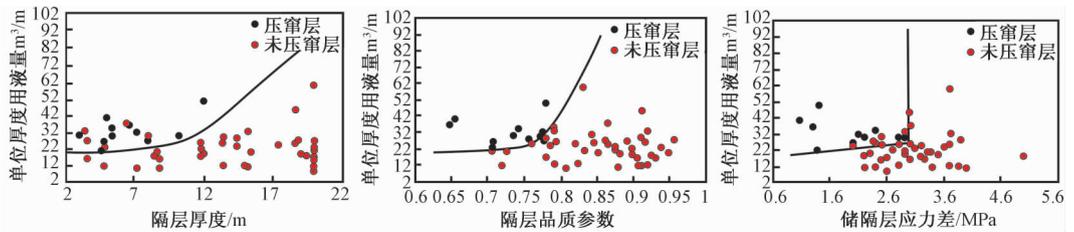


图 5 隔层厚度、隔层品质、储隔层应力差参数与单位厚度用液量对比关系图

Fig. 5 Relation diagram respectively between liquid quantity per unit thickness and interlayer thickness, interlayer quality, Reservoir interlayer stress difference parameters

图 1 中的卫 1-#7 井的葡 15 层压裂施工中采用的单位厚度用液量为  $30 \text{ m}^3/\text{m}$ 。该层与下隔层的应力差为 2.9 MPa, 计算的单位厚度用液量上限为  $43.5 \text{ m}^3/\text{m}$ 。下隔层厚度达到 3 m, 计算的单位厚度用液量上限为  $21.486 \text{ m}^3/\text{m}$ 。下隔层品质参数为 0.779, 计算的单位厚度用液量上限为  $32.43 \text{ m}^3/\text{m}$ 。而该层压裂施工时, 采用的单位厚度用液量为  $30 \text{ m}^3/\text{m}$ , 从隔层厚度角度来看存在造成压裂窜槽的可能性。

#### 4 各参数影响作用在实际压裂设计中的应用

上述研究表明, 隔层厚度、隔层品质、储隔层应力差参数对实际压裂设计中的压裂方式、压裂排量、单位厚度用砂量、单位厚度用液量有一定的约束限制作用。将这些约束作用实施到实际井例的压裂设计中, 有效避免了压裂窜槽现象的

发生。

按照油水层解释结果, 卫 2-3#-2# 井的葡 12 层、葡 14 层、葡 15 层均为差油层, 需要进行压裂改造; 葡 16a 层为水层, 不予实施压裂。图 6 给出了卫 2-3#-2# 井应力及自然伽马曲线的分层情况。表 1 给出了各小层相应的储隔层应力差、隔层厚度、隔层品质等参数, 以及落入图 2、图 3 中的情况。可以看出葡 12、葡 14 层均落在非窜层区, 可在压裂软件计算的参数条件下实施常规压裂, 而葡 15 层的下部隔层落入窜层区, 若直接采用压裂软件计算参数进行压裂施工, 必然会将葡 16a 水层压窜, 造成压裂失败。

表 2 给出压裂软件计算的压裂施工参数。按照前文给出的针对储隔层应力差、隔层厚度、隔层品质参数的压裂排量、单位厚度用砂量、单位厚度用液量的上限公式, 计算出使葡 15 层压窜的“压裂排量”、“单位厚度用砂量”、“单位厚度用液量”约束限制值 (见表 2)。从表 2 可以看出, 对

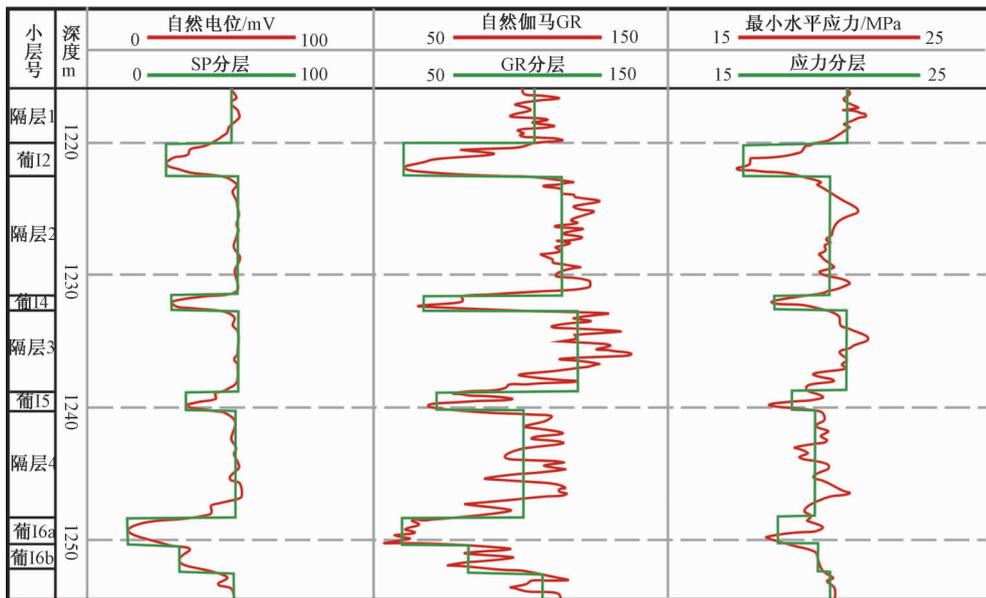


图6 卫2-3#-2#井应力及自然伽马曲线的分层情况

Fig. 6 Results of stress calculation and layering of natural gamma curve of wei 2-3#-2#

表1 卫2-3#-2井待压裂层及相应参数计算结果

Table 1 Layer to be fractured of wei 2-3#-2# and parameter calculation results respectively

层号	井段	上隔层应力差/Mpa	下隔层应力差/Mpa	上隔层泥岩品质	下隔层泥岩品质	上隔层厚度/m	下隔层厚度/m	岩层参数在图2、图3中的位置
葡12	1220.2 ~ 1222.6	3.6	3	0.744	0.894	5.6	9	上(下)隔层均落入非窜层区
葡14	1231.6 ~ 1232.8	1.9	2.5	0.894	0.978	9	60	上(下)隔层均落入非窜层区
葡15	1238.8 ~ 1240.2	2.1	1.3	0.978	0.682	6	8	上隔层落入非窜层区, 下隔层落入窜层区

表2 压裂软件计算的压裂施工参数及不同参数对应的压窜约束限制值

Table 2 Fracturing operation parameters calculated by fracturing software and pressure constraint values of corresponding parameters

输入参数	不同的参数对应的压窜约束限制值			压裂软件设计数据	预计支撑缝半长(m)	预计支撑缝宽(mm)
	隔层应力差 = 1.3Mpa	隔层泥岩品质 = 0.682	隔层厚度 = 8m			
单位厚度用砂量 $m^3/m$	3.6	3.59	3.45	4.73		
单位厚度用液量 $m^3/m$	20.31	20.82	22.71	29.9	90	5.0
压裂排量 $m^3/min$	2.0	2.0	2.3	2.2		

于“隔层应力差 = 1.3 MPa”的情况,为保障层不被压窜,“单位厚度用砂量”“单位厚度用液量”、“压裂排量”的值应不大于  $3.6 m^3/m$ 、 $20.31 m^3/m$ 、 $2.0 m^3/min$ ;对于“隔层泥岩品质 = 0.682”的情况,为保障层不被压窜,“单位厚度用砂量”“单位厚度用液量”、“压裂排量”的值应不大于  $3.59 m^3/m$ 、 $20.82 m^3/m$ 、 $2.0 m^3/min$ ;对于“隔层厚度 = 8 m”的情况,为保障层不被压窜,“单位厚度用砂量”“单位厚度用液量”、“压裂排量”的值应不大于  $3.45 m^3/m$ 、 $22.71 m^3/m$ 、 $2.3 m^3/min$ 。按照压裂软件设计,“单位厚度用砂量”、“单位厚度用液量”、“压裂排量”的值约为  $4.73 m^3/m$ 、 $29.9 m^3/m$ 、 $2.2 m^3/min$ 。显然,软件设计参数明显高于计算的约束值。实际生产中,

采用将“单位厚度用砂量”、“单位厚度用液量”、“压裂排量”的值设定为  $3.6 m^3/m$ 、 $22.71 m^3/m$ 、 $2.2 m^3/min$  进行施工,获得压裂成功。

## 5 结论

1. 本文以施工压裂曲线的瞬时停泵压力数据为约束,优化建立基于测井数据计算地层最小水平应力剖面的方法。连续的最小水平应力曲线可提供储层及邻近泥隔层的应力差值,可为压裂施工设计提供依据。

2. 建立合理的分层取值技术,以砂岩储层、泥岩隔层为研究对象,构建储隔层应力差、隔层品质参数、隔层厚度等参数来反映岩层自身的应

力及隔层条件。以压裂“窜层”、“非窜层”为判别标准,研究岩层自身的应力及隔层条件与压裂施工设计中的施工排量、加砂强度等参数的匹配关系图版,这些图版可有效避免现场压裂施工过程中的压裂窜槽情况。

3. 针对一个区块的已有压裂施工数据,建立相应的约束图版,可以有效提高压裂施工的成功率,同时将约束条件追加到压裂设计软件中能促进软件的适用性。

## 参 考 文 献

- [1] 张红艳,谢富仁,崔效峰. 四川芦山地震区域构造环境与构造应力场特征 [J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35 (2): 99 ~ 106.  
ZHANG Hong-yan, XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng. Regional characteristics of tectonic stress field and tectonic setting of Lushan Earthquake in Sichuan [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35 (2): 99 ~ 106.
- [2] 翟明国. 大陆动力学的物质演化研究方向与思路 [J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37 (4): 1 ~ 14.  
ZHAI Ming-guo. New research interests and concept of material evolution for continental dynamics [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37 (4): 1 ~ 14.
- [3] 王星辉. 三轴剪切总应力强度指标的回归求值 [J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26 (1): 52 ~ 54.  
WANG Xing-hui. Regression solution for general stress intensity of the tri-axis shearing [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26 (1): 52 ~ 54.
- [4] 马寅生. 地应力在油气地质研究中的作用、意义和研究现状 [J]. 地质力学学报, 1997, 3 (2): 41 ~ 46.  
MA Yin-sheng. The role and significance of crustal stress in petroleum geology and its present situation [J]. Journal of Geomechanics, 1997, 3 (2): 41 ~ 46.
- [5] 宋杰. 砂岩油藏地应力及岩石力学参数与套管损坏相关性 [J]. 地质力学学报, 2014, 20 (3): 324 ~ 330.  
SONG Jie. The correlations between geological stress and casing damage and between rock mechanics parameters and casing damage in sandstone reservoir [J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20 (3): 324 ~ 330.
- [6] 葛洪魁,林英松,王顺昌. 地应力测试及其在勘探开发中的应用 [J]. 石油大学学报 (自然科学版) 1998, 22 (1): 94 ~ 99.  
GE Hong-kui, LIN Ying-song, WANG Shun-chang. In-situ stresses determination technique and its applications in petroleum exploration and development [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1998, 22 (1): 94 ~ 99.
- [7] 余雄鹰,王越之,李自俊. 声波法计算水平主地应力值 [J]. 石油学报, 1996, 17 (3): 59 ~ 63.  
YU Xiong-ying, WANG Yue-zhi, LI Zi-jun. Calculation of horizontal principal in-situ stress with acoustic wave method [J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17 (3): 59 ~ 63.
- [8] 黄荣樽,邓金根. 利用测井资料计算三个地层压力剖面 [A]. 测井在石油工程中的应用论文集 [C]. 信阳: 中国石油学会, 1994, 43 ~ 44.  
HUANG Rong-zun, DENG Jin-gen. Three formation pressure profile determined by log information [A]. Proceeding of Application of Logging in Petroleum Engineering [C]. Xinyang: Chinese Petroleum Society, 1994, 43 ~ 44.
- [9] Xin Z B, Guan H, Laronga R J, et al. Understanding reservoir properties through high-definition microresistivity images in horizontal shale oil wells drilled with OBM in China [A]. SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific [C]. Brisbane, Australia: SPE, 2013.
- [10] 申辉林,朱玉林. 成像测井资料在安棚油田地应力研究中的应用 [J]. 新疆石油地质, 2007, 28 (5): 628 ~ 630.  
SHEN Hui-lin, ZHU Yu-lin. Application of imaging logging data to stress research of Anpeng field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (5): 628 ~ 630.
- [11] 王晓杰,彭仕宓,吕本勋,等. 用正交偶极阵列声波测井研究地层地应力场 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2008, 32 (4): 42 ~ 46.  
WANG Xiao-jie, PENG Shi-mi, LÜ Ben-xun, et al. Researching earth stress field using cross-dipole acoustic logging technology [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32 (4): 42 ~ 46.
- [12] 刘之的,夏宏泉,汤小燕,等. 成像测井资料在地应力计算中的应用 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27 (4): 9 ~ 12.  
LIU Zhi-di, XIA Hong-quan, TANG Xiao-yan, et al. The application of the formation stress calculation using image well logging data [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27 (4): 9 ~ 12.
- [13] 张美玲,王喜东,周正,等. 基于 Gristensen 算法的砂岩储层横波速度计算方法 [J]. 数学的实践与认识, 2014, 44 (22): 142 ~ 149.  
ZHANG Mei-ling, WANG Xi-dong, ZHOU Zheng, et al. Sandstone shear wave speed calculation method based on Gristensen Algorithm [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2014, 44 (22): 142 ~ 149.
- [14] 张美玲,牟立伟,简建华. 地层主应力综合计算方法及其在套损预测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31 (3): 1281 ~ 1288.  
ZHANG Mei-ling, MU Li-wei, LIN Jian-hua. Comprehensive calculation method of formation principal stress and its application in prediction of casing damage [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31 (3): 1281 ~ 1288.
- [15] 万仁溥,罗英俊. 采油技术手册-第九分册-压裂酸化工艺技术 [M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 1998, 180 ~ 202, 490 ~ 517.  
WAN Ren-pu, LUO Ying-jun. Handbook of Petroleum Production Technology [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998, 180 ~ 202, 490 ~ 517.
- [16] 李军,巩小雄,李翔,等. 分层压裂工艺技术在吐哈油田的研究与应用 [J]. 新疆石油天然气, 2007, 3 (3): 50 ~ 55.  
LI Jun, GONG Xiao-xiong, LI Xiang, et al. Study on separate layer fracturing technology and its application in Tuha oilfield [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3 (3): 50 ~ 55.
- [17] 董建华,刘鹏,王薇. 地应力剖面在水力压裂施工中的应

- 用 [J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29 (2): 40~42.
- DONG Jian-hua, LIU Peng, WANG Wei. Application of in-situ stress profile to hydraulic fracturing [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29 (2): 40~42.
- [18] 郭大立, 王祖文, 胡广军, 等. 射孔层位优化方法与分层压裂技术研究 [J]. 西南石油大学学报, 2007, 29 (6): 116~118.
- GUO Da-li, WANG Zu-wen, HU Guang-jun, et al. The optimal method of perforated intervals and the separate-layer fracturing technology [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29 (6): 116~118.
- [19] 刘钦节, 闫相祯, 杨秀娟. 分层地应力方法在薄互层低渗油藏大型压裂设计中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2009, 31 (4): 83~88, 93.
- LIU Qin-jie, YAN Xiang-zhen, YANG Xiu-juan. Application of stratified stress method in massive hydraulic fracturing design [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2009, 31 (4): 83~88, 93.
- [20] 刘子晋. 水力压裂求地应力在大庆油田的应用 [J]. 华北地震科学, 1985, 3 (S1): 87~94.
- LIU Zi-jin. The application of the method of underground stress obtained by hydrofracture to the development of Daqing Oil Field [J]. North China Earthquake Sciences, 1985, 3 (S1): 87~94.
- [21] 谭廷栋, 司徒丽丽. 地层孔隙压力与破裂压力的计算 [A]. 中国石油学会测井专业委员会. 测井在石油工程中的应用论文集 [C]. 北京: 石油工业出版社, 1996, 8~18.
- TAN Ting-dong, SITU Li-li. The calculation of formation pore pressure and fracture pressure [A]. Petroleum Well Logging [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996, 8~18.
- [22] 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 测井曲线融合方法研究及其在分层中的应用 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2008, 23 (6): 6~10.
- YAN Jian-ping, CAI Jin-gong, ZHAO Ming-hai, et al. Study on integration of multiple logging curves and its application in geological stratification [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23 (6): 6~10.
- [23] 于均民, 李红哲, 刘震华, 等. 应用测井资料识别层序地层界面的方法 [J]. 天然气地球科学, 2006, 17 (5): 736~738, 742.
- YU Jun-min, LI Hong-zhe, LIU Zhen-hua, et al. Identifying sequence stratigraphy boundaries using well logging [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17 (5): 736~738, 742.
- [24] 雍世和, 张超谟. 测井数据处理与综合解释 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1996, 43~46.
- YONG Shi-he, ZHANG Chao-mo. Logging Data Processing and Comprehensive Interpretation [M]. Dongying: Journal of China University of Petroleum, 1996, 43~46.
- [25] 张美玲, 林丽丽, 杜贵彬, 等. 勘探评价井连续岩性剖面测井分层取值技术 [J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33 (5): 41~46.
- ZHANG Mei-ling, LIN Li-li, DU Gui-bin, et al. Layer value technology study on successive lithology profiles logging of exploration evaluation wells [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33 (5): 41~46.
- [26] Zhang S Q, Zhang M L, Bao Y, et al. Geological evaluation of puzzle reservoirs in Putaohua reservoir of Weixing Oilfield [J]. Advanced Materials Research, 2013, 652/654: 2490~2495.

## THE APPLICATION OF GEOSTRESS LAYERING TECHNOLOGY IN FRACTURE DESIGN OPTIMIZATION

ZHANG Mei-ling<sup>1</sup>, DONG Chuan-lei<sup>1</sup>, LIN Jian-hua<sup>2</sup>

(1. Institute of Geoscience, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China;

2. Well Logging Company of Daqing Drilling and Exploration Company, Daqing 163412, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The distribution of longitudinal continuous geostress is of great guiding significance for fracture construction design. Take putaohua reservoir in weixing oil-field as the research object, combined with the actual fracturing data of the reservoirs, the mathematical model of the minimum geostress which is calculated by the continuous logging data is optimized to establish, offering the reasonable continuous geostress profile along the well shaft. Based on the layers of the spontaneous potential curve, getting a value of curves of stress profile and natural gamma according to certain rules, parameters of interlayer thickness, interlayer stress difference and interlayer quality between the to-be fractured layers and on (under) interlayers layers are calculate. the actual fracture design data of the study area are used to avoid the channeling during the fracturing process. This study provides the constraint conditions of the construction parameters of rock formations, such as fracturing displacement, sand filling intensity, liquid quantity per unit thickness and fracturing way. The application of actual experience shows that the conditions can effectively guarantee the success rate of the fracturing technology of mineral exploration and development.

**Key words:** geostress; fracture; layering technology; logging data; channeling; weixing oil-field