

低渗透油田人工裂缝参数与井网的匹配

李迎新 大庆油田采油工程研究院

摘要：低渗透油田油井自然产能低，支撑裂缝的方位将直接影响注水开发油田的最终采收率。根据区块地应力预测成果，结合砂体展布情况，进行人工裂缝参数与井网匹配性研究，对裂缝方位规则区块进行人工裂缝方位与矩形井网的匹配研究，优化油水井人工裂缝长度等参数；对复杂边界、地应力方位变化较大的区块，根据砂体展布与应力分布关系，对人工裂缝参数进行适当调整。该技术应用在大庆油田州201区块整体压裂优化设计上，州201区块采用地质工程一体化设计方法压裂施工29口井，施工成功率100%。措施后29口直井采油井初期单井平均增油3.9 t/d，取得了明显的压裂增产效果。

关键词：岩石力学参数；井网匹配；地应力；人工裂缝

doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2013.1.009

低渗透油田油井自然产能低，大部分需压裂投产，而常规井网尤其是复杂断块油藏不规则井网，在实施整体压裂改造时，支撑裂缝的方位将直接影响注水开发油田的最终采收率。

1 低渗透油田地应力研究

低渗透油田地应力分布复杂，区内最大主应力方向变化很大。目前矩形井网设计仍以单井地应力测试资料代表整个区块地应力为主，没有考虑构造位置、射孔层位的不同带来的地应力差异。因此，在部署井网前应首先搞清地应力大小和方位，并预测人工裂缝在平面上的分布情况。

1.1 应用测井数据预测岩石力学参数变化规律

对比低渗透油田X MAC测井和常规测井资料，岩石物理参数与常规测井GR, AC, LLD曲线对应较好。因此，用多元统计回归方法得到岩石力学参数与常规测井数据的关系。

$$YMOD = -0.064 \times DT + 0.266 \times GR + 1.078 \times LLD$$

$$POIS = 0.0003 \times DT + 0.001 \times GR + 0.0028 \times LLD$$

$$CLP = 0.01 \times DT + 0.2757 \times GR + 0.3714 \times LLD$$

式中YMOD为杨氏模量；POIS为泊松比；CLP为岩石闭合压力；DT为声波时差；GR为自然伽马；LLD为深侧向电阻率。

1.2 岩石力学三维模型的建立

通过分析地震波阻抗模型与杨氏模量、泊松比、岩石破裂压力梯度、岩石闭合压力梯度等参数的关系，发现波阻抗与岩石力学参数之间具有良好的线性相关关系。

由测井曲线数据计算的岩石力学参数和已知井点的岩石力学参数作为约束，依靠大量丰富的井间地震波场信息进行约束反演，做出整个研究区各岩

石地层的剪切模量、杨氏模量和体积模量空间连续变化数据体，得到区域的岩石力学场的连续变化模型，见图1。该模型反映出了三维空间上连续变化的信息。

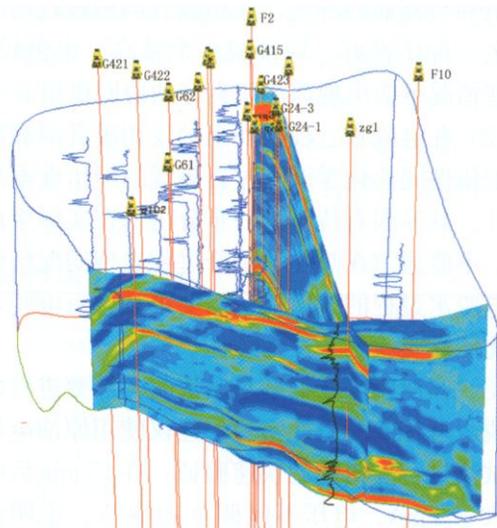


图1 岩石力学三维模型建立示意

1.3 人工裂缝方位预测及验证

对多个构造运动时期产生的裂缝位置和方向进行预测，得到多期构造运动产生裂缝的累加结果，预测出裂缝方向。依据上述方法，对州201区块进行裂缝预测，采用电位法井间检测技术对4口井裂缝方位预测结果进行了验证，地应力方向最大误差30°，平均7.5°。

2 地应力剖面解释技术

2.1 无横波条件下地应力计算方法

2.1.1 横波时差的模型建立

在横波求取方法建模过程中，利用的是从交叉



偶极子横波测井中提取的纵波及横波资料,而实际中,真正求取横波时不能保证提供从X MAC提取出来的纵波资料。因此,在建模之前,要对实测纵波与从X MAC提取的纵波之间的等效性进行验证,以便确定不同的测井资料可互换性。

分析了大庆低渗透油田26口井5.5万组数据,回归出DTC与DT(测井)公式,在此基础上,应用纵波及密度计算横波时差。

$$DTC = 4.43 + 1.0168DT - 5.68633 \times 10^{-4}DT^2$$

$$TS = A \cdot DTC + B \cdot DEN/DTC - C$$

式中TS为计算的横波时差;DTC为已知的纵波时差;DEN为已知的密度;A、B、C为系数。

2.1.2 应用测井资料计算地应力模型

目前最常用的计算水平应力的模型是孔弹性水平应变模型,其公式为

$$\sigma_x = \frac{\mu}{1-\mu}P_0 - \frac{\mu}{1-\mu}\alpha_v P_p + \alpha_h P_p + \frac{E_s}{1-\mu^2}x + \frac{\mu E_s}{1-\mu^2}y$$

$$\sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu}P_0 - \frac{\mu}{1-\mu}\alpha_v P_p + \alpha_h P_p + \frac{E_s}{1-\mu^2}y + \frac{\mu E_s}{1-\mu^2}x$$

式中 σ_x 为最小水平应力; σ_y 为最大水平应力; E_s 为静态杨氏模量; x 为最小水平应力方向上的应变; y 为最大水平应力方向上的应变; α_v 为垂向的孔弹性常数; α_h 为水平的孔弹性常数。

2.2 模型精度实例计算验证

根据已有探井、开发井资料,对大庆外围低渗透油田进行地应力的模拟,计算的地应力与有横波条件下地应力进行了对比,孔弹性水平应变模型误差可控制在8%以内。

3 人工裂缝参数与井网匹配研究

根据区块地应力预测成果,结合砂体展布情况,进行人工裂缝参数与井网匹配性研究,对裂缝方位规则区块进行人工裂缝方位与矩形井网的匹配研究,优化油水井人工裂缝长度等参数;对复杂边界、地应力方位变化较大的区块,根据砂体展布与应力分布关系,对人工裂缝参数进行适当调整。

3.1 人工裂缝与井网匹配

大庆油田州201区块采用400 m × 80 m、360 m × 80 m和300 m × 60 m矩形井网布井,油井的穿透率取0.3~0.7,水井的穿透率取0.5~0.9。从不同穿透率下的含水率随时间变化关系可以看出,穿透比越大,见水越早,相同生产时间的含水越高。因此从控制含水和提高水驱效果考虑,确定注水井裂缝穿透比为0.7~0.9。在州201试验区选取了9口注

水井进行微地震法水驱前缘测试和大地电位法测试。两种方法的测试结果与预测结果基本一致。布置的注水井井排与人工裂缝方位一致,注入水向裂缝推进特征较明显,基本实现了线状注水开发,提高了储层的动用程度。

3.2 人工裂缝与砂体匹配

为保证州201区块矩形井网的对称性,避免单翼裂缝过长导致油水井排压力场不均匀,以精细地质研究为基础,利用井震资料对整个区域应力场进行解释,构建全区、各层组的力学参数三维数据体,辅助对各层位油水井排建立有效驱动,对井点的裂缝半长进行优化。其中对位于构造边部及断层附近的油井,进行单方向定向射孔,形成与油层匹配的压裂裂缝。

由于肇34-271井西侧距断层60 m,为防止压裂造缝与断层沟通,对该井东侧进行单向射孔,控制施工规模。压后初期日产油4.1 t,采油强度0.44 t/(d·m),投产两个月后日产油3.2 t,采油强度0.34 t/(d·m)。

试验区注水井全部采取东西向定向射孔,实施大型压裂后投注。统计20口注水井动态数据,视吸水指数投产初期为0.28 m³/(d·MPa·m),一年后仍为0.26 m³/(d·MPa·m),能够满足配注要求。

3.3 现场应用效果

该技术应用在大庆油田州201区块整体压裂优化设计中,州201区块采用地质工程一体化设计方法压裂施工29口井,施工成功率100%。措施后29口直井采油井初期单井平均增油3.9 t/d,取得了明显的压裂增产效果。

4 结语

(1) 利用井震资料建立岩石力学参数三维数据体,能够反映纵向上和横向上岩石力学参数变化。

(2) 在无成像测井资料情况下,应用常规测井数据计算横波时差和地应力。

(3) 综合人工裂缝缝长和导流能力对开发指标的影响,优化与开发井网相适应的人工裂缝参数。

(4) 形成了低渗透油田人工裂缝参数与井网匹配技术方法,该技术在庆油田州201区块整体压裂优化设计中进行了实际应用,29口措施井初期单井平均增油3.9 t/d,取得了明显的压裂增产效果。

(栏目主持 杨 军)

