

# 水力压裂参数监测设备研制与应用

张旭<sup>1</sup> 方勇<sup>2</sup> 程刚<sup>2</sup> 黎力<sup>3</sup> 马帅帅<sup>2</sup> 尚延峰<sup>2</sup>

(1. 延长气田采气三厂 陕西延安 716000; 2 陕西延长油田压裂材料有限公司 陕西延安 716000; 3 陕西延长油田检验技术服务有限公司 陕西延安 716000)

**摘要:** 水力压裂的参数监控技术, 对于提高低渗透油田的采收率具有重要的作用。在压裂施工中, 根据裂缝的长度、高度和方位, 对井网进行优化, 优化压裂设计或其它的油田开发措施, 从而实现与油井的经济效益的最大化。

**关键词:** 水力压裂; 监测技术; 油田

## Development and application of hydraulic fracturing parameter monitoring equipment

Zhang Xu<sup>1</sup>, Fang Yong<sup>2</sup>, Cheng Gang<sup>2</sup>, Li Li<sup>3</sup>, Ma Shuai Shuai<sup>2</sup>, Shang Yanfeng<sup>2</sup>

(1. Yan'an Gas Production Plant 3, Shaanxi Yan'an 716000; 2. Yan'an Fracturing Materials Co., Ltd., Shaanxi Yan'an 716000; 3. Yan'an Inspection Technology Service Co., Ltd., Shaanxi Yan'an 716000)

**Abstract:** The parameter monitoring technology of hydraulic fracturing plays an important role in improving the recovery efficiency of low permeability oil fields. In fracturing construction, the well network is optimized based on the length, height, and orientation of cracks, and fracturing design or other oilfield development measures are optimized to maximize the economic benefits of the oil well.

**Key words:** hydraulic fracturing; Monitoring technology; oil field

### 引言

对石油和天然气井有关工作而言, 无论从任何方面进行水压分析, 这都是一个尤为重要的环节。而效果的好坏, 则直接关系到石油和天然气开采的费用问题。所以, 要想取得预期的效果, 就需要对有关的监测数据展开分析, 而针对监测过程中所产生的问题, 同时也极大地促进了实时监测技术的普及和应用。它能够对整个压裂过程进行全方位的监测, 并且能够及时的反馈结果。

### 一、直接远源裂缝监测技术

这一监测方法主要有: 微震裂纹描绘技术和测斜仪裂纹描绘技术, 压裂施工中采用地面或相邻井段的裂缝参数测定方法, 但不能测量出裂隙的导水率和有效裂隙的长度。这种方法的准确度会随着距离增加而降低。

#### (一) 地面-地下测斜仪裂缝描述技术

在进行水力压裂的同时, 其周围的岩层也会发生变形。利用高灵敏度的测斜仪, 对产生的多个倾角(由变形引起)部位的压裂裂隙进行反演, 获得压裂裂隙的几何形状及方向。在地表条件下, 压裂引起的变形与裂缝的倾角、方位、距离裂缝中心的深度和裂缝的

总体积有关。例如, 不管是在坚硬的碳酸盐岩中, 还是在酥松的砂岩中, 又或者是杨氏模数较低的硅藻岩中, 都会出现一条长度相等的纵向裂隙。变形区为两个由两个不对称的凸起带(当裂隙发生倾角时, 凸起即为不对称)所环绕, 其规模由裂隙的规模决定, 而两个凸起间的间距由裂隙中心的深度决定。上述概念虽简单, 但却能决定几个重要的压裂参数, 如裂缝倾角、方位角、距离裂缝中心不够准确和非均匀发展造成的裂缝位移等。随着裂隙深度的增加, 倾斜区的走向及特征形态未发生变化。但随着裂隙的增加, 其倾斜度逐渐减小。

目前的测斜仪可以处理由裂缝造成的纳米级倾角, 也可以用来测量 3000 米以上(大型)压裂工程。地表倾斜计成图技术已经在从 6 米至 3600 米的深部进行了数以千计的水力压裂试验。破裂方向(倾角、方位)在浅部 2° 以下(<1200mm)至深层(5°~10°)之间存在差异。地表倾角的测量结果, 则可由矿区、岩芯、相邻井的裂隙剖面, 乃至地表裂隙等来验证。地表坡度测量最大的缺陷就是不能准确确定裂度大小。

综上所述, 通过测斜裂缝描述技术, 可以实现如下两个目标:

1.对压裂裂缝的倾角、方位和形态进行测量,为水驱方案的制定提供依据。2.改进压裂理论,为压裂施工提供参量,并与放射性测井技术相结合,对压裂裂缝高度进行精确性评估。

## (二) 微地震裂缝描述技术

微地震监测技术,指的是利用对工业生产活动中可能出现的微地震活动的观测与研究,以便于对工业活动的作用、影响以及地下条件加以控制的一门地球物理科学技术。因为在微地震观测中,对于震源地点、震源频率、产生时间等都存在着未知的信息,而判断这些因素就是微地震观测的首要任务。这一任务的实现,主要是借用了自然地震工程学的技术和理念。微地震活动出现在断面上,如断裂。一般来说,这种断层表面是比较稳定的,不过,由于开采过程中产生的初始应力被扰动,在原有的或新形成的断裂周边区域,就会产生应力集中、应变能增加等现象。当外部作用力达到一定程度后,裂纹区域将会出现围岩变形或屈服,裂纹扩张,释放出部分储存的能量(即声学),形成微小地震。大多数微震发生在200-1500Hz之间,持续时间在1秒以内。根据已有的观测资料,我们发现微震是以明显的脉冲形式出现的,越是微弱的微震,其发生的频率和持续的时间就会越高,同时伴随着较低的能量和较低的破裂长度。

## 二、直接压裂井裂缝测量技术

### (一) 放射性同位素裂缝检测技术

在压裂过程中,在支撑剂和压裂液中掺入了放射性同位素,在压裂结束后,用伽玛仪测定了井眼周围0.3-0.6m区域的辐射强度。采用多个同位素测井方法,可以测定不同含沙率下的含沙量和前置液量。这种方法仅能测得裂缝高度的下限。

### (二) 生产测井

声学测井可以探测到当液体通过井围流入地面时产生的噪声,而生产测井则包含了地层流速,压强,水温,流体密度和伽玛辐射等。在钻井过程中,可以根据钻井记录来判断钻井过程中的地层流体种类和流量。在无水油藏条件下,可用上述两种方法来测定靠近井眼的裂隙高度。在多层压裂过程中,套筒并能够识别出所形成的射孔地层,从而判断出哪个地层已经成功地进行了压裂。

### (三) 温度测井

井温测井,也叫热测井,是一种能够测定地层温度梯度的测井方法。能够在产液井中找到产液井段,在注水井中找到注水井段;对于热采井,可以用相邻井的井温来检验注汽效果;并对压裂和酸化施工进行了效果评估。井温测井法测定压裂缝高的理论基础非常

简单,这是由于对注入的流体进行了压缩,或在压缩之后,人为地注入了流体,从而引起的一种低温异常,在此基础上,结合井温测井数据,确定压裂后的裂隙高度。在注水之前,井筒与储层之间存在着充分的热量交换,所以,在注水之前,井筒温度曲线一般与储层的岩层热物性及地温梯度密切相关。注液后,因注液的温度通常比地层温度低,故注液后的井温曲线在吸液层段会有一个较低的温度异常,这一异常反应了储层是否有压裂裂隙及展布程度。在注入压裂液的时候,底部的温度会降低,因此在压裂以前,就必须先对压裂地层的高温基线进行测定,接着,在压裂以后的24h以内,再对其进行多次的高温测量,之后,再将其和高温曲线加以比较,就能够测算出土壤岩层中的高温交替。

## 三、间接裂缝监测技术

### (一) 压裂压力诊断技术

根据测量到的压力和压力下降数据,可以得到裂缝的几何参数和压裂液的性能参数,这对进行加砂压裂非常重要和有效。压裂压力检测是基于压裂施工过程中以及停止抽油后的井筒压力变化,对压裂过程中的裂缝扩展情况以及相关的储层、压裂液等关键参数进行预测,从而为压裂方案设计、压裂施工提供依据。

### (二) 净压力分析诊断技术

基于单裂隙模型,构建多裂隙数值计算模型,实现对多裂隙几何尺寸、发育条数的量化表征,从而揭示天然裂隙发育程度和复杂性对压裂改造的影响。比如,在试验压裂末期,2-4个压裂裂纹仍在发展;在加砂压裂接近尾声时,仍有3-8道压裂裂缝在不断扩大。利用多裂隙的建模方法,可以解释在施工时产生的高净压力,并根据对净压力的拟合分析,对储层中的压裂液效率、应力敏感性等关键参数进行判定,将裂隙模式的半长从100米的平面裂隙变为30米的假定裂隙,以此来指导压裂方案的调整,提高油藏开采效率。

## 四、监测系统硬件设计

### (一) 监测管柱

监测管柱对压裂施工起着很大的作用。在压裂施工中,能够准确地测量并反映出井下的情况。由于其能够进入井的下层,在此之前,通过设计有关的频率,配合一定的遥控功能,可以存储井下的压力、温度等各种问题,在压裂完成后,将监测管柱取出,即可提取相关的数据,并将其反馈到技术的成果中,从而更加详细的了解。

该技术具有以下几个突出的优势:第一,它的两面都能同时放置两台设备,可以进行比较,保证数据的正确性;二是其环形结构,可将其与管道连接起来,形成一道同心圈,便于测量工作进行,且

可推广到更广的区域；三是坚固性，因为采用了沟槽设计，所以能将管子牢牢地固定在上面，在强烈的振动下也能保持不倒，这给测量工作带来了很大的方便。

## (二) 监测仪器

这台监测仪由许多部件组成，例如：信号处理与存储部件、监控部件、电源部件等，其破裂压力可达 100MPa，准确率为 0.1%。而且，它的感应系统，也是非常强大的，而且，它的感应系统，也是 A 级的。无论是温度还是压力，监视器都可以在不同的情况下，对它们进行加热，以保证最后的结果是准确的。在能耗上，还有效降低了功耗，24 位高精度 AD 单片机系统，在保证工作顺畅的前提下，也能尽量减少能耗。它的存储部件可以被重复写入超过十万次，而相应的监控装置，则可以通过“看门狗”技术和电源显示，存储量更是高达二十万。在测试前，用 USB 接口把监控装置与上位机相连，完成对上位机的一些调试、处理工作，然后把得到的数据录入单片机中。在测试的时候，监控 CPU 还能定时发送信息，在此过程中，对传感器的压力、温度等数据进行控制和转换，将它转换成易于按次序依次写入内存的电子数据。在压裂管柱和带水监视器被抬出后，读取该过程中的数据，资料重播的过程，同时也是将某些资料，如温度、压力，等资料成批地储存起来的过程。

## 五、监测系统软件设计

### (一) 系统结构

压力分析系统包含了报表检视、资料录入、印刷模板的内容等，通过对监控装置监测到的井下温度、压力等信息的分析，并根据这些资料，这样就能准确地分析出井下的压力和温度变化，这样就可以得到裂隙参数。使用该软件的原因，还因为其中所含的模型十分精确，操作起来也很方便，可以在数据上为整个压力处理过程提供有力的支撑。该压力分析软件包括以下步骤：开始运行→输入参数信息→接收传感器所传输的监测数据→加载相关数据→分析数据→判断数据，若发现问题，应立即发出报警，若无问题，则可输出得到的结果。输出的结果也有两种格式，一种是报告，一种是图表。前者的计算结果要包括裂隙的大小、闭合压力、闭合时间、渗透率和导流率等；而对于后者来说，最重要的就是图像，它包含了这样一种工艺的建造曲线，压力和温度的变化曲线，还有管道的压力和温度的变化曲线。

### (二) 软件技术

#### 1、基本原理

在储层压裂时，要根据储层内流体压力的变化，对储层内的一

些现象进行数据的输入和分析。然后根据这些数据，建立了裂隙大小和压力的对应关系，进而得出了相关的数学模型，再根据这些数据，分析了不同时期的水压变化，由此可以得出一个粗略的结论。整体而言，此方法藉由二维裂隙模式来增加其准确度。

#### 2、裂缝模型的判断

(1) 在这项技术之中，所建立的裂隙模型，是采用了前阶段的压力与时间之间的关系所建立的一个对数曲线，基于压力和注射时间的数据，可以使这条曲线形成一条线性关系，曲线的斜率表示它们各自的指数，对裂隙的形状进行了进一步的分析。

(2) 采用综合分析法。采用综合判别法，即将地应力判别法与双对数判别法相结合，即可判定裂隙类型。首先利用地应力来判定裂隙的类型，分别为竖向裂隙和水平裂隙，然后利用裂隙的坡度来判定裂隙是否为 KGD 或 Radil。在准确地确定了开裂时刻之后，就可以通过有关数据来解释开裂的情况，并且，在某种程度上，还可以在施工过程中进行监测。

#### 结语

总结来说，水力压裂监控技术不仅能够确保压力施工的顺利进行，还能够对该过程中所涉及到的压力、温度等数值进行实时的监测，并且能够对该过程中所涉及到的压力、温度等数值进行实时的监测。水力压裂技术不仅能够有效地改善传统监测技术中所存在的问题，同时还能够与新的信息技术相结合，更加智能地监测所需的相关数据。

#### 参考文献

- [1] 祖万山. 水力压裂参数监测设备研制与应用[J]. 煤炭技术, 2022, 41(1): 184-187.
- [2] 隋微波, 温长云, 孙文常, 等. 水力压裂分布式光纤传感联合监测技术研究进展[J]. 天然气工业, 2023, 43(2): 87-103.
- [3] 苏岳, 赵文军, 王利民. 综采工作面水力压裂试验研究与应用[J]. 山西焦煤科技, 2020, 44(8): 13-17.
- [4] 韩宇通. 水力压裂技术在低透气性煤层瓦斯抽采中的应用[J]. 山西化工, 2023, 43(5): 145-146, 154.
- [5] 李鹏. 水力压裂技术在煤矿瓦斯治理中的应用研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(2): 4-6.
- [6] 曾祥斌. W-S-W 水力压裂技术在瓦斯抽采中的模拟与实践[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(12): 94-96, 99.
- [7] 杨朝兴. 水力压裂技术在采煤工作面顶板弱化中的应用研究[J]. 能源与节能, 2022(8): 183-185.