

压裂实时监测及诊断技术处理系统的研制及应用

曹学军* 康杰 何灿
(中国石化集团西南石油局油气测试中心)

曹学军等. 压裂实时监测及诊断技术处理系统的研制及应用. 天然气工业, 2002; 22(3): 42 ~ 44

摘 要 针对目前油气田旧压裂仪表车普遍存在的监测系统不完善、监测数据不通用、无实时诊断处理技术及国外新版监测系统价格昂贵的情况, 研制开发了一套压裂实时监测及诊断技术处理系统。该系统能实时采集压裂施工所有数据和曲线显示, 并能进行裂缝模型判断、压裂压力曲线分析、变排量处理和压降处理, 经现场 40 余井次的应用表明该系统性能稳定, 采集及处理的数据准确, 对现场施工和优化设计有重要的指导意义, 有广阔的推广应用前景。

主题词 压裂 监测 裂缝模型 压力曲线 解释 处理技术

压裂是油气田目前最有效的增产措施之一, 在压裂施工过程中, 为了保证施工顺利进行、减小风险以及对施工过程和地层情况分析的需要, 需要实时

监测施工过程中的各种参数, 并通过计算机将参数显示在屏幕上。这些参数的监测和处理, 不仅为现场施工指挥人员提供了控制施工过程的依据, 同时

缝温度场的变化, 以确定不同施工阶段破胶剂追加浓度, 既满足携砂对压裂液粘度的要求, 又确保施工后压裂液彻底破胶, 减轻储层伤害, 提高压裂效果。

表 2 为在不同温度下压裂液流变数据及压裂过

由表 2 可看出: 采用压裂液优化设计技术设计的压裂液添加剂添加方法, 通过配制不同浓度基液的压裂液, 大大减少了进入地层中的稠化剂总量, 提高了单位工作液中破胶剂与稠化剂的比例, 有效降低了压裂液对储层的伤害, 改善了压裂液破胶效率。

表 2 压裂液现场配方设计

种类	时间段 (min)	配方 编号	排量 (m ³ /min)	注入液量 (m ³)
前置液	0 ~ 36	1 号	2.8	100
携砂液	37 ~ 47	2 号	3.5	38.5
携砂液	48 ~ 60	3 号	3.5	45.5
携砂液	61 ~ 63	4 号	3.5	10.5
携砂液	64 ~ 80	5 号	3.5	59.5

程分段温度的基础上得到的压裂液现场配方设计。针对该井设计的压裂液现场配方实际上使用了经流变仪评价的 5 种配方(破胶剂浓度由 200 ppm 过铵、100 ppm 激活剂增加到 900 ppm 过铵, 1 200 ppm 激活剂, 稠化剂浓度由 0.55 % GRJ —11 降为 0.40 % GRJ —11), 缩短了破胶时间, 改善了压裂液破胶效果, 使压裂液在 3 ~ 4 h 彻底破胶, 水化液粘度小于 8.0 mPa · s。

结 论

1) 压裂液优化设计技术使压裂液的选择与应用逐渐朝向既满足工艺要求又满足低成本、代表着压裂液发展的方向。

2) 通过在新场上沙溪庙组气藏实施压裂液优化设计技术, 可实现压裂液配方与压裂施工的合理匹配, 既满足压裂施工的顺利进行, 又达到低伤害的要求。

参 考 文 献

1 崔明月. 压裂液优化设计及应用技术. 钻井液与完井液, 1998(3)
2 卢拥军. 有机硼 BCL - 61 交联植物胶压裂液. 油田化学, 1995(4)
3 龙政军. 压裂液性能对压裂效果的影响分析. 钻采工艺, 1999(1)

(收稿日期 2001 - 12 - 08 编辑 钟水清)

*曹学军, 1971 年生, 工程师; 1996 年毕业于西南石油学院采油工程, 现从事酸化压裂现场技术管理工作。地址: (618400) 四川省什邡市皂角开发区酸化压裂队。电话: (0838) 8230560。

也为工程设计人员和各种解释软件提供了真实可靠的第一手资料。

系统硬件功能结构及特性

将系统按不同功能划分为中心处理子系统、数据转换采集子系统、前端信号调理及连接子系统、打印输出子系统、数据显示子系统、电源子系统、散热子系统、减震子系统 8 个子系统^[1]。该系统能对 10 个信号点进行准确的信号采集和信号转换,并具有可靠、稳定、灵活、直观及可扩展五大特性。

系统软件功能及特性

实时监测系统可实时采集并显示完整的油压、套压、井底压力、总排量、交联排量、砂比、砂量、阶段液量、累计液量共 9 项施工数据和 8 条施工曲线,并可及时输出各种施工数据报表、施工曲线、施工报告。解释处理系统可进行压裂压力分析、模型判断、变排量诊断处理、测试压降分析,监测及解释的数据及时、准确、可信。

解释处理技术

1. 压力解释技术^[2~4]

(1) 压裂压力解释基本原理

压裂压力分析原理是借助于流体在岩石中流动产生的压力变化来解释发生在地层深处的复杂现象,而其分析所建立的数学模型则是通过裂缝的几何尺寸与井底净压力的关系来实现,并通过注入期间井底流体压力的变化来分析压裂过程和压后情况。本文采用成熟的二维裂缝模型分析原理。

(2) 模型几何尺寸及注入时间与井底净压力的关系

注入期间压力的解释方程式由物质平衡方程、流体渗流方程和裂缝可塑性方程联立求得。由诺尔特(Nolte)于 1996 年给出方程的求解结果可知:对于 PKN 模型,井底压力 p_w 随缝长 L 的延伸而增加;而 KGD、Radil 模型,井底压力 p_w 随缝长 L 、半径的延伸而减少;各种模型井底净压力 p_w 都随平均裂缝缝宽 w 的扩展而增加,即: $p_w \propto w$; PKN 模型井底压力随施工时间的增加而增加;KGD、Radil 模型,井底压力随施工时间的增加而减小。

(3) 裂缝模型的判断

1) 利用前置阶段压力与时间的双对数曲线来判断裂缝模型。由压力与注入时间关系式可知其双对数图必将产生直线关系,其斜率即为各自的指数。

利用指数可判断出裂缝形态,即:当 $k = (1/8, 1/3)$ 为 PKN 模型,当 $k = (-1/2, -1/4)$ 为 KGD 模型,当 $k = (-1/2, -3/16)$ 为 Radil 模型;由于 KGD 模型和 Radil 模型的斜率相近,因此实际运用该法时 KGD 与 Radil 难以区分。

2) 应用地应力来判断。根据岩石力学原理和破裂准则,水力裂缝形态取决于地应力中垂向主应力与水平主应力的相对大小,并且裂缝总是垂直于最小主应力,据此可判断裂缝类型。即:当 $\sigma_z > \sigma_x > \sigma_y$ 时,裂缝面垂直于 σ_y 而平行于 σ_x 的方向;当 $\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x$ 时,裂缝面垂直于 σ_x 而平行于 σ_y 的方向;当 $\sigma_x > \sigma_y > \sigma_z$ 或 $\sigma_y > \sigma_x > \sigma_z$ 时,形成水平缝。

3) 采取综合法判断。由以上可知,综合地应力判断方法和双对数判断方法可唯一确定出裂缝类型,即先由地应力判断出垂直缝或水平缝,再由双对数斜率准确判断出 KGD 模型和 Radil 模型。

(4) 压裂压力解释技术

基于上述分析,先判断裂缝模型再利用净压力与施工时间的双对数曲线斜率解释裂缝三个方向的延伸情况,据此对压裂施工进行实时分析和处理。

2. 变排量实时诊断处理技术

(1) 变排量处理基本理论

迈克尔理论表明射孔摩阻与施工排量的平方成正比,井眼附近摩阻与施工排量的平方根成正比,据此可通过在小型压裂或前置时做变排量测试,并作出不同排量降对应的压降直角坐标关系曲线,由此可判断摩阻趋势并计算出准确的射孔摩阻和井眼附近摩阻。其计算公式如下:

$$\Delta p_{pf} = 228.88 \rho_{fluid} \frac{Q^2}{n_p^2 d_p^4 C_d^2}$$

$$\Delta p_{tf} = \Delta p - \Delta p_{pf}; \Delta p_{tf1} = \Delta p_1 - \Delta p_{pf1}; \Delta p_{tf2} = \Delta p_2 - \Delta p_{pf2}; \Delta p_{tf3} = \Delta p_3 - \Delta p_{pf3}$$

式中: Δp_{tf} 、 Δp_{pf} 、 n_p 、 d_p 、 C_d 分别为压差、孔眼摩阻、射孔孔数、孔眼直径、孔眼流量系数。

因井眼附近摩阻与排量成类平方根关系,故总摩阻也表现为类平方根曲线形式,代表以井眼附近摩阻为主的图版曲线;而射孔摩阻与排量成平方关系,故总摩阻表现为平方曲线形式,代表以射孔摩阻为主的图版曲线。

(2) 射孔摩阻和井眼附近摩阻产生的原因

射孔摩阻产生的原因主要有:射孔弹发射率低、射孔深度不够、射孔孔眼不完善等。

井眼附近摩阻产生的原因主要有:射孔方位与裂缝方位夹角偏大及初始裂缝与裂缝延伸方向不一

致引起的裂缝弯曲摩阻、井眼附近泥浆漏失大等引起的裂缝延伸摩阻、初始裂缝宽度不够及微裂缝发育等引起的压裂液流动摩阻。

(3) 射孔摩阻和井眼附近摩阻的处理技术

根据变排量处理结果结合地质及前期完井情况判断出摩阻产生的具体原因,并采取相应的处理技术。处理技术主要包括重新射孔、喷砂射孔、高能气体压裂、增加压裂液黏度、小砂比冲蚀、段塞式加砂预处理等。

3. 压裂压降解释技术^[4]

测试压裂或压裂停泵后井口(井底)压力是递减的,递减速度必定反映裂缝本身及其周围地层的情况,故可利用压力递减速度求出有关压裂裂缝参数。

(1) 拟合压力计算

停泵后任两个时刻压力差为:

$$\Delta p(\delta^*, \delta) = p(\delta^*) - p(\delta)$$

拟合压力差为: $\Delta p^*(\delta^*, \delta) = p^* G(\delta^*, \delta)$

式中: $G(\delta^*, \delta) = (4/\pi) [g(\delta) - g(\delta^*)]$; $g(\delta) = (4/3) [(1 + \delta)^{2/3} - \delta^{3/2} - 1]$; $\delta = t/t_0$

传统的曲线拟合方法是根据压力递减资料,应用时间函数 $G(\delta^*, \delta)$ 做出样板曲线,同时做出压差函数 $\Delta p(\delta^*, \delta)$ 与无因次时间 δ 的关系曲线,将样板曲线与实测压差曲线重叠比较,得出拟合压力 p^* 。显然,曲线拟合方法与人为操作有关,一般有较大误差,且操作不便。为此采用一种新的数学拟合方法来计算拟合压力 p^* ,首先构造一个目标函数:

$$e(p) = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{j=1}^n [\Delta p(\delta_i^*, \delta_j) - \Delta p^*(\delta_i^*, \delta_j, p)]^2 \right\}$$

这样,求拟合压力使 p^* 的问题便归结为求下列极小值问题: $e(p^*) = \text{Min}\{e(p)\}$

由于目标函数 $e(p)$ 是一单峰值函数,因此上述最小值问题可用最优化方法(如黄金分割法)求出拟合压力 p^* 。

(2) 压裂参数的计算

由拟合压力 p^* 可计算出滤失系数(C_L)、压力递减比(ρ)、压裂液效率(η)、裂缝长度(L)或裂缝半径(r_f)、裂缝平均宽度(W)、裂缝闭合时间(T_C)等参数。

压裂实时解释处理技术软件

将上述解释处理技术研制成不同的解释处理系统软件,该解释处理系统中,据压裂压力分析可判断裂缝模型及裂缝延伸情况,据变排量诊断处理技术

可获得井筒摩阻、射孔摩阻及井眼附近摩阻并进行相应处理,据测试压降分析可获得闭合压力、闭合时间、压裂液性质、地应力数值等评价参数,为压后评估和优化设计提供科学依据。形成了以压裂实时监测、压裂压力分析、压降测试处理和变排量诊断处理为主的技术系列。

应用及实例

经过现场 40 余井次的应用,表明采集的数据准确、可靠,对现场施工和优化设计有重要的指导意义,取得了良好效益,具有良好的推广应用前景。

根据川孝 170—2 井压裂施工及变排量处理曲线分析:由处理结果表明该井以井眼附近弯曲摩阻为主,经处理后确保了压后产量增至 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。川合 140 井由变排量诊断得井眼附近弯曲摩阻高达 9.5 MPa 经两次小砂比段塞冲蚀处理后由 9.5 MPa 下降到 3 MPa,在 65 MPa 的高施工压力下确保了该井顺利加砂 25 m^3 ,为川西合兴场 J_2s 气藏的勘探评价提供了可靠依据。

根据金佛 1 井测试压裂处理实例分析:经测试处理表明该井地层特别致密、微裂缝发育、井眼附近摩阻高达 19 MPa,从而证实了地质及测井解释数据,为该井的后期改造决策提供了重要依据。

结论与认识

1) 该系统的开发应用(8 万人民币),与哈哩伯顿压裂仪表车数据采集系统(17 万美元)和国外新压裂仪表车数据采集系统(42 万美元)相比不仅节约了大量资金,还解决了旧仪表车不能全面监测施工数据、长期靠人工记录来获取施工参数的方法,实现了压裂数据采集与实时监测技术的自动化和智能化。

2) 该系统解决了旧仪表车监测系统不能进行解释处理的落后问题,取得了在压裂实时监测的基础上形成以裂缝模型判断、压裂压力分析、变排量测试及压降处理为核心的解释处理系统。

3) 现场应用表明,该系统具备进一步改造其他旧压裂仪表车的广泛推广应用前景。

参考文献

- 1 周耀华. 数值信号处理. 上海:复旦大学出版社,1998
- 2 王鸿勋. 水力压裂原理. 北京:石油工业出版社,1979
- 3 赵金洲. 水力压裂技术. 北京:石油工业出版社,1999
- 4 [美]J.L. 吉德利等. 水力压裂技术新发展. 北京:石油工业出版社,1995

(收稿日期 2001-12-08 编辑 钟水清)

duction being obvious.

SUBJECT HEADINGS: Xinchang gas field ,J₂s gas reservoir ,Fracturing design ,Three dimensional ,Fracturing optimization

Lin Lishi (*engineer*) ,born in 1970 ,received his Bachelor 's degree in oil and gas applied chemistry from the Southwest Petroleum Institute in 1994. Now he is engaged in the research on fracturing design and technology. Add: No. 11 ,Huaihe Street ,Deyang ,Sichuan (618000) ,China Tel: (0838) 2409132

APPLICATION OF FRACTURING FLUID OPTIMIZATION DESIGN IN J₂s GAS RESERVOIR IN XINCHANG FIELD

Dan Chun ,Yang Xianli and Liu Suhua (Oil and Gas Testing Centre of Southwest Petroleum Bureau ,Sinopec) . *NATURAL GAS IND.* v. 22 ,no. 3 ,pp. 40 ~ 42 ,5/ 25/ 2002 , (ISSN1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT: Through the research on the application of fracturing fluid optimization design techniques (including overall fracturing fluid performance optimization ,temperature field calculation in fracturing process ,and dynamic fracturing fluid variable-constituent add-on technique ,etc.) in the fracturing operation in J₂s gas reservoir in Xinchang field ,it is indicated that on the basis of the temperature field calculation in fracturing process ,the fracturing fluid composition designed according to fracturing fluid rheological property experimental data and the dynamic quantitative add-on method of additives are beneficial to reduce operating cost and to optimize the fracturing fluid performance.

SUBJECT HEADINGS: Fracturing fluid ,Optimizing design ,Performance optimization ,Temperature field ,Dynamic add-on technique

Dan Chun (*engineer*) ,born in 1973 ,received her Master 's degree in applied chemistry from the Chengdu University of Technology in 1999. Now she is engaged in the research on the reservoir protection and stimulation. Add: No. 11 ,Huaihe Street ,Deyang ,Sichuan (618000) ,China Tel: (0838) 2409132

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE TREATMENT SYSTEMS OF FRACTURING TIMELY MONITORING AND DIAGNOSING TECHNIQUES

Cao Xuejun ,Kang Jie and He Can (Oil and Gas

Testing Centre of Southwest Petroleum Bureau ,Sinopec) . *NATURAL GAS IND.* v. 22 ,no. 3 ,pp. 42 ~ 44 ,5/ 25/ 2002. (ISSN 1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT: A set of treatment systems of fracturing timely monitoring and diagnosing techniques have been developed ,because there are imperfect monitoring system ,uncommonly used monitor data and lack-of timely diagnosing and treatment techniques in the old fracturing instrument trucks in the oil and gas fields in China at present and the price of foreign novel monitoring system is expensive. These systems can timely acquire all the data in fracturing operation and these data may be indicated as curves ,and can make fracture model judgement ,fracturing pressure curve analysis ,variable-displacement treatment and pressure drop treatment ,etc. Through applying on the spot for over forty well-time ,it is shown that these systems are of stable performance and the data acquired and treated by the systems are accurate. Therefore they have important guiding signification for on-site fracturing operation and fracturing optimization design and have a vast range of prospects for popularization and application.

SUBJECT HEADINGS: Fracturing ,Monitoring ,Fracture model ,Pressure curve ,Interpretation ,Treatment technique

Cao Xuejun (*engineer*) ,born in 1971 ,graduated in oil production engineering at the Southwest Petroleum Institute in 1996. Now he is engaged in on-the-spot acidizing and fracturing technical management. Add: Shifang ,Sichuan (618400) ,China Tel: (0838) 8230560

SAND CONTROL TECHNIQUE OF DISCHARGE FLUIDS AFTER SAND FRACTURING

He Shiyun and Chen Chen (Oil and Gas Testing Centre of Southwest Petroleum Bureau ,Sinopec) . *NATURAL GAS IND.* v. 22. no. 3 ,pp. 45 ~ 46 ,5/ 25/ 2002. (ISSN 1000 - 0976 ; **In Chinese**)

ABSTRACT: Effective discharge fluids and sand control after sand fracturing have an important influence on the well test and gas production in the next stage. In the paper ,in light of the strata with high deliverabilities and high self-discharge capacities ,some measures of discharge fluids and sand control after sand fracturing are put forward through analyzing many factors of effecting sand production. A good result has been achieved by applying on the spot.

SUBJECT HEADINGS: Sand fracturing ,Propping agent ,Discharge fluid ,Velocity ,Sand control ,Technique

He Shiyun (*engineer*) ,born in 1972 ,graduated in reservoir engineering from the Southwest Petroleum Institute in 1995. Now he is engaged in the works of oil and gas well testing.