

石油工程与深层岩石力学进展

——第五次全国深层岩石力学学术会议论文集

陈勉 邓金根 金衍 主编

石油工业出版社

石油工程与深层岩石力学进展

——第五次全国深层岩石力学学术会议论文集

陈 勉 邓金根 金 衍 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

中国岩石力学与工程学会深层岩石力学专业委员会组织召开了第五次全国深层岩石力学学术讨论会暨全国石油工程理论与技术进展论坛会议,本书收集了该会议的部分论文,主要是研究深水石油开发、特殊结构钻井开发、复杂地层油气勘探开发等问题。

本书适合从事石油工程岩石力学方面研究的科研人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程与深层岩石力学进展:第五次全国深层岩石力学学术会议论文集/陈勉等主编. —北京:石油工业出版社,2008.4

ISBN 978 - 7 - 5021 - 6548 - 2

I. 石…

II. 陈…

III. 石油工程 - 岩石力学 - 学术会议 - 文集

IV. TE21 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 641886 号

石油工程与深层岩石力学进展

陈勉 邓金根 金衍 主编

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523535 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京华正印刷有限公司

2008 年 4 月第 1 版 2008 年 4 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:19.75

字数:504 千字 印数:1—300 册

定价:58.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

在石油工程中所涉及的地层具有高围压、高孔隙压力、高温度的特点,其岩石变形和强度有别于水利水电工程、边坡工程、地下巷道工程等浅部地层。随着全球能源形势的变化,石油天然气的勘探开发技术面临更多的挑战,深水石油开发、特殊结构钻井开发、复杂地层油气勘探开发等问题亟待深入研究。

2007年11月,由中国岩石力学与工程学会深层岩石力学专业委员会组织召开了第五次全国深层岩石力学学术讨论会暨全国石油工程理论与技术进展论坛会议,旨在邀请全国岩石力学同行交流最新研究成果,研讨新的发展方向,以推动石油工程与岩石力学的发展,推进岩石力学与其他学科的交叉融合,并促进岩石力学在工程领域,特别是在石油领域的应用。本书中的论文均选自该次会议报告,在一定程度上反映了近年来石油工程与深层岩石力学研究方面的研究进展。

在本论文集编辑过程中,彭小佳、郭艳红、周健等做了大量工作,在此表示衷心感谢。

由于编撰时间仓促,编者水平有限,难免有漏误之处,敬请读者批评指正。

编者

2007年11月

目 录

基于分形方法的水力压裂裂缝起裂扩展机理研究 ... 李 玮 闫 铁 毕雪亮 于 洋(1)	
胜利油田砂砾岩储层压裂改造实践 孟庆民 张士诚 陈培胜 王 磊 张俊琛(7)	
吉林油田地应力变化对重复压裂技术的影响 魏兆言(12)	
地层破裂试验和 Kaiser 效应法联合确定地应力方法研究 陈军海 庄东志(17)	
初次裂缝诱导应力场研究 尚希涛 何顺利 刘广峰 刘 辉(23)	
考虑岩石变形的异常高压气藏数值模拟研究 阳仿勇 李杰传 魏东兰(28)	
基于层次分析法的坍塌卡钻风险因素权重确定 蒋建乐(34)	
高含水期剩余油分布模拟的平面网格大小划分研究 冯明生 别爱芳 李香玲(39)	
断层区域构造应力场的新方法研究 侯冰 马威 董维哲(43)	
地应力分析解释技术在水力压裂中的应用 陈晓红 张士诚(49)	
地应力测量方法 员伟峰 耿立峰 赵 娜 彭小佳(54)	
山前高陡构造破碎带的井壁失稳机理数值模拟研究 邹灵战 邓金根(59)	
重复压裂技术在新站油田的应用 姚 飞 吴晓东 张广清(65)	
利用声波研究盐岩地层地应力的现状综述 张 艳(70)	
岩石应力各向异性的形成机理实验研究 彭小佳(76)	
变形介质低渗透油藏非达西流动压力动态分析 田守增 李根生 同登科(81)	
水力压裂中支撑剂的实际导流能力影响因素分析 姜 泮(85)	
地铁隧道下穿既有线结构沉降反分析研究 艾传志 王芝银 李云鹏(90)	
水力裂缝垂向扩展定量风险评估 张国强(95)	
T33 块火山岩油藏注水开发方式研究 陈 洪 杜雪彪 李先杰(99)	
稠油出砂冷采出砂量预测模型 师俊峰 吴晓东 尹克涛 何岩峰(105)	
MTS 三轴岩石刚性试验机测深层岩石力学参数方法 崔锐锐(110)	
地面驱动单螺杆泵采油系统生产参数动态预测 ... 李远超 杨 坤 师俊峰 黄 伟(115)	
驱替速度对低渗透非均质储层水驱效果的影响 ... 尤 源 岳湘安 王 锐 李先杰(120)	
齐 40 块中深层稠油油藏蒸汽驱开发驱替规律 赵春梅 张 鹰 王中元 户昶昊 宫宇宁(125)	
欠平衡钻井随钻预测储层压力的理论与实用方法研究 王利国 杨 虎 王克贵(131)	
塔里木盆地中部隆起 I 号坡折带裂缝性储层压裂施工曲线分析 陆仁德 周 健 王小佗(138)	

基于分形方法的水力压裂裂缝起裂扩展机理研究

李 玮 闫 铁 毕雪亮 于 洋

(大庆石油学院提高油气采收率教育部重点实验室)

摘 要:根据岩石裂缝扩展规律,用岩石应力强度因子很容易建立裂缝的扩展准则。为了方便问题解决,裂纹形态被假设为沿直线路径扩展的,但这影响了临界扩展力的实际计算精度。本文引入分形几何理论,利用分形几何模型来描述岩石断裂裂纹的曲折形态,进而建立了裂纹分形模型下的岩石应力强度因子表达式。在此基础上,以裸眼井为例分析了井底岩石的起裂压力,并建立了考虑裂纹分形扩展的缝内压力计算模型和裂缝宽度方程。理论分析表明:考虑裂纹分形扩展后的模型计算数值大于直线型扩展的计算结果。这对于水力压裂作业中施工压力高于理论计算值的原因从理论上给出了一个解释。

关键词:水力压裂 断裂韧性 分形裂纹 裂缝起裂 裂缝扩展

在断裂力学中,为了探讨材料的断裂性能,Griffith^[1]和 Irwin^[2]提出了著名的裂纹临界扩展力准则。阐明了裂纹临界扩展力与单位宏观量度断裂面积表面能之间的关系。由于岩石是一种特殊的主要呈脆性的材料,因此常采用线弹性力学理论来分析水力压裂裂缝扩展行为。

水力压裂岩石实际上是井壁岩石在液压力的作用下起裂、扩展的过程。到 20 世纪 80 年代末,已经形成从二维到三维的一系列裂缝几何形态描述模型,为现场压裂施工的顺利进行提供依据。由于使用的线弹性断裂力学理论,这些模型在拟合施工压力时存在计算结果偏小的局限性。这其中的一个根本问题就是断裂韧性将裂纹形态假设为沿直线路径扩展,影响了临界扩展力的实际计算精度。

无论是在宏观上还是在微观上,岩石的断裂面绝大部分都是粗糙的,不规则的,对此学者谢和平进行了深入的研究^[3-5]。本文将在以前的研究成果的基础上,考虑岩石裂缝扩展的不规则性,应用分形几何思想建立分形裂缝扩展下的岩石应力强度因子模型,通过对井眼附近应力场进行分析,来建立裸眼井的水力压裂裂缝起裂、扩展模型。

1 直线型裂纹假设的岩石断裂韧性

水力压裂中多应用张开型裂纹来建立裂缝的延伸准则。由断裂力学原理可知张开型应力强度因子 K_I 与断裂能 G_c 存在如下关系:

$$K_I = A\sqrt{G_c} \quad (1)$$

$$A = \sqrt{E/(1 - \mu^2)}$$

$$G_c = 2r_s$$

式中 A ——断裂面积；
 E ——岩石弹性模量；
 μ ——岩石泊松比；
 r_s ——单位宏观量度断裂面积表面能。

根据 Bowie、Frees、Clifton^[6,7] 提出的受内压厚壁空心圆柱形岩样测定断裂韧性的方法。设空心圆柱体内半径为 a ，外半径为 b ，裂纹深度为 H ，内压为 p ，并设外径与内径之比为 W 。则裂尖应力强度因子为：

$$K_I = K^* (p\sqrt{\pi a}) \quad (2)$$

式中 K^* ——无量纲修正系数，它是 $H/(b-a)$ 和 W 的函数。

Clifton^[6] 给出了内置衬套的空心圆柱形岩样承受均匀内压时 K^* 随 $H/(b-a)$ 和 W 变化的关系曲线，即 K^* 值根据该曲线来确定。

2 分形裂纹假设下的岩石断裂韧性

经典断裂力学的一个基本假设是将岩石断裂轨迹视为直线型平面模型，而现场实测和实验观测均表明，无论在晶粒尺度上还是在断层尺度上，岩石的断裂面都是非常不规则和粗糙的，难以用一个平直面直线型裂纹来近似模拟^[8]。

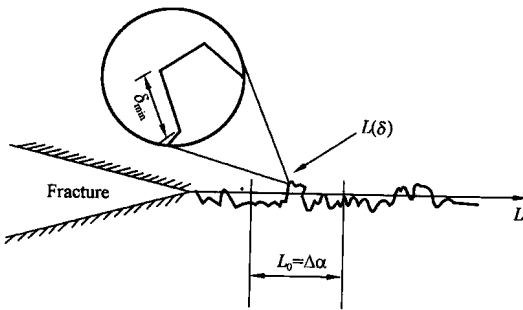


图1 按分形裂纹扩展的水力压裂示意图

实际地下岩石水力压裂缝的断裂表面是凹凸不平的，裂纹扩展路径是不规则的，弯弯曲曲的（见图1）。

根据 Mandelbrot^[9] 分形曲线长度 (L) 的估计式：

$$L(\delta) = L_0 \delta^{1-D} \quad (3)$$

式中 L_0 ——裂纹路径的直线长度；

δ ——码尺；

D ——不规则扩展路径的分形维数。

可近似地选择 $\delta \approx r$ ， r 是自相似比。这样式(3)可近似表示为：

$$L(\delta) = L_0 \left(\frac{1}{r} \right)^{D-1} \quad (4)$$

根据谢和平^[4] 可知裂纹不规则扩展下临界断裂能可表示为：

$$G_{\text{crit}} = 2r_s (1/r)^{(D-1)} \quad (5)$$

由式(1)可推导得如下关系：

$$K_{\text{ID}} = K_I (1/r)^{(D-1)/2} \quad (6)$$

式中 K_{ID} ——沿分形裂纹断裂的岩石强度因子。

依据最为广泛的岩石断裂韧性判据^[2]，知：

$$K_{\text{ID}} \leq K_{\text{IDC}} \quad (7)$$

式中 K_{ID} ——I型分形裂纹断裂强度因子,它反映了裂尖应力奇异性的强度,与材料和裂缝的尺寸及所受载荷有关;

K_{IDC} ——断裂韧性,是材料对裂缝扩展阻力的一种度量,它是一个通过实验确定的材料常数。

由式(6)知裂纹不规则扩展下,岩石断裂路径较直线假设要长,所以裂纹沿分形路径断裂的岩石断裂韧性要大于按直线扩展情况。

3 裸眼井井壁岩石起裂准则

岩石起裂准则是对岩石在应力达到临界时发生破坏进行描述的标准。目前在水力压裂设计中基本使用拉伸断裂准则和剪切断裂准则,以最大拉应力理论为基础的拉伸断裂准则预测裂缝起裂模型使用更多些。当最小主应力为水平主应力时,此时产生的是垂直裂缝。随着井底压力的增大,井壁有效水平周向应力达到或者超过岩石的抗张强度时,在垂直于水平周向应力的方向产生垂直裂缝。

在水力压裂破裂前,深部井眼岩石的应力分布是由原始地应力场、孔内流体压力和井壁应力集中所构成^[10]。在压裂前,要判断井筒围岩破裂前的应力状态。假设岩石为均质各向同性弹性介质,无渗透,远场作用着两个水平地应力 σ_h 、 σ_H , p_w 为钻井液柱压力, p_p 为地层孔隙压力。若以压应力为正,则裸眼直井孔壁处的应力状态为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p_w \\ \sigma_\theta &= (\sigma_H + \sigma_h) - 2(\sigma_H - \sigma_h) \cos(2\theta) - p_w \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对于裸眼完井井筒,当有效周向应力 $\sigma_{\theta e}$ 达到岩石的抗张强度时,垂直裂缝产生,即:

$$\sigma_{\theta e} = \sigma_\theta - \alpha p_p \geq -\sigma_T \quad (9)$$

由于 $\sigma_H > \sigma_h$, 可知,水力裂缝会产生在 $\theta = 90^\circ$ 处,即意味着裂缝在垂直于最小主应力方向产生。由式(8)整理上式可得破裂压力(p_f)为:

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_H - \alpha p_p + \sigma_T \quad (10)$$

断裂韧性和岩石的抗拉强度可以通过下式连接:

$$\sigma_T = \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi a_c}} \quad (11)$$

式中 a_c ——岩石的长度级特征(如缺陷或岩石颗粒尺寸)。

根据式(6)整理得:

$$\sigma_T = \frac{K_{IDC}}{\sqrt{\pi a_c \left(\frac{1}{r}\right)^{D-1}}} \quad (12)$$

式中 $a_c \left(\frac{1}{r}\right)^{D-1}$ ——分形尺度下的岩石的长度级特征。

将式(12)代入到式(10)中,即可建立岩石断裂韧性与起裂压力之间的关系式。通过该式应用现场小型水力压裂实验数据可以计算压裂层岩石断裂面的分形维数,为后续岩石扩展计算提供必要的计算参数。

4 分形裂纹假设下裂缝扩展模型

如图2,无限大平板内有一长为 $2L$ 的裂缝,与最大主应力方向平行,裂缝内流体压力为 p_w 。对于内压恒定的I型张开的二维裂缝, Irwin 发现应力强度因子可以简化为:

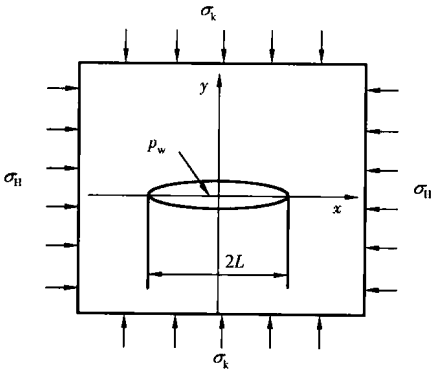


图2 张开型二维裂缝示意

$$K_I = p_{net} \sqrt{\pi L} \quad (13)$$

式中 L ——裂缝半长;
 p_{net} ——裂缝张开的净内压。
 当根据式(6)得:

$$K_{ID} = p_{net} \sqrt{\pi L \left(\frac{1}{r}\right)^{D-1}} \quad (14)$$

$$p_{net} = p_w - \sigma_h$$

式中 $L \left(\frac{1}{r}\right)^{D-1}$ ——分形尺度下的裂缝长度;当裂缝张开到 $L \left(\frac{1}{r}\right)^{D-1}$ 长度之后,裂缝尖端的应力强度因子为 K_{IDC} ,裂缝开始扩展。

在式(6)的基础上,满足本文假设而不改变原文假设的情况下可将文献^[11]中裂缝宽度方程重新推导为:

$$\omega(x) = \frac{4}{\pi E} K_{IDC} \sqrt{\frac{L^2 \left(\frac{1}{r}\right)^{D-1} - x^2 \left(\frac{1}{r}\right)^{1-D}}{\pi L}} \quad (15)$$

式(15)表明:不管液体压力如何分布,断裂面的形态只与裂缝长度、岩石断裂韧性和弹性模量有关。裂缝形态方程的唯一性说明水力压裂裂缝具有形态上的自相似扩展特征,其中断裂韧性起着重要的作用。

为了形象的描述裂纹形态和方便式(14)、式(15)中断裂韧性的计算,把裂纹的弯折段看作是裂纹扩展的生成元,如图3所示的分形裂纹扩展模型来描实际裂纹扩展段。由此可以用式(16)计算出分形裂纹扩展的分维数^[12],

$$D_f = \frac{\log 3}{\log(5 + 4\cos\theta)^{1/2}} \quad (16)$$

将 $n=3$; $\frac{1}{r} = (5 + 4\cos\theta)^{1/2}$ 代入到式(6)得:

$$K_{ID} = K_I (5 + 4\cos\theta)^{(D_f-1)/4} \quad (17)$$

其中 $\theta = \arccos \frac{(3^{2/D_f} - 5)}{4}$

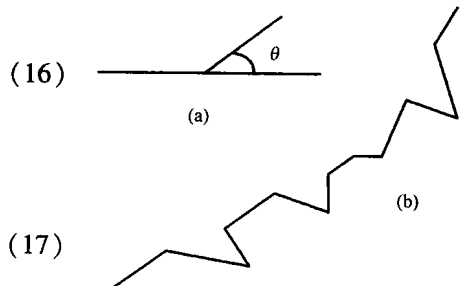


图3 裂纹扩展的分形模型

将式(17)代入到式(14)、式(15),即可得到:

$$K_{ID} = p_{net} \sqrt{\pi L(5 + 4\cos\theta)^{D_f-1}} \quad (18)$$

$$\omega(x) = \frac{4}{\pi E} K_{IC} (5 + 4\cos\theta)^{\frac{D_f-1}{4}} \sqrt{\frac{L^2(5 + 4\cos\theta)^{\frac{D_f-1}{2}} - x^2(5 + 4\cos\theta)^{\frac{1-D_f}{2}}}{\pi L}} \quad (19)$$

式(19)即为考虑沿分形裂纹扩展的缝宽方程。式中的 K_{IC} 可以通过目的层取心室内测定,也可以通过现场实验来确定。 D_f 可以通过取心室内测定,也可由现场实验经式(12)计算得到。因此,根据式(18)和式(19)用分形裂纹模型来描述岩石断裂的非规则扩展,揭示了分形裂纹的不规则程度和裂缝弯折角对缝内压力、裂缝宽度的影响。这对于水力压裂过程的岩石断裂、扩展机理研究有一定的现实意义。通过式(19)在给定注入压裂液体积即可计算裂缝尺寸;当以恒定排量注入的时候,可以确定缝宽、缝壁压力以及裂缝扩展速度。

如图4对式(16)进行了分析,结果表明分形维数随弯折角增大而增大,整个曲线呈指数关系。这说明岩石断裂裂纹越曲折,裂纹的分形维数越大。依据式(17)可知,裂纹的分形维数越大,岩石应力强度因子也就是越大。图5对不同假设下裂缝内压力随分形裂纹弯折角变化进行分析,结果表明内压力比值随弯折角变化呈指数关系。说明岩石裂纹越曲折,岩石断裂需要的内压力就越大。

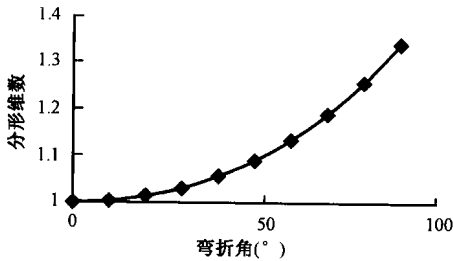


图4 分形维数随弯折角变化关系

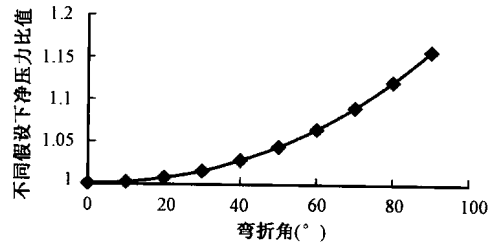


图5 不同假设下内压力比值随弯折角变化关系

当考虑地层水力压裂裂缝的分形效应之后,模型的计算结果发生变化:得到的岩层断裂应力强度因子要较原先假设裂缝壁面光滑时所算得的值大,本文模型的研究成果变化趋势与文献^[10]吻合,即需要更大的内压力来维持裂缝扩展,这在理论上解释了直线型假设下内压力计算小于实际施工压力的原因。

5 结论

(1)对水力压裂后岩石粗糙的断裂面进行分析,建立了基于分形裂纹的岩石断裂韧性模型。该模型体现了岩石断裂裂纹的特点,提高了岩石断裂韧性的实际测试精度,使得岩石断裂韧性的测量更接近实际情况。

(2)分析了裸眼井井眼岩石的应力场状态,并得出分形裂纹假设下二维平面裂缝扩展的临界条件和缝宽方程,以此可以分析水力压裂裂缝扩展过程。

(3)分析结果表明,应用分形裂纹扩展模型需要的裂缝内压力比直线型大,这对于水力压裂作业中施工压力高于理论计算值的原因从理论上给出了一个解释。

参考文献

- [1] Griffith A. A. Theory of rupture[A]. Proc. 1st Int. Congress Appl. Mech; Delft, 1924. 55 ~ 63
- [2] Irwin G. . Fracture dynamics. Fracturing of Metals. Am. Soc. for Met, 1948: 147 ~ 166
- [3] Xie H P, Sanderson D J. Fractal Effect of Rapidly Propagation Cracks. In; Proc. of the 2nd Int. Corof Nonlinear Mech. Beijing 1995
- [4] 谢和平, 高峰, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究. 防灾减灾工程学报. 2003, 23(4): 1 ~ 9
- [5] 谢和平. 脆性材料裂纹扩展分形运动学. 力学学报, 1994, 26(6): 757 ~ 762
- [6] Bowie O. L, Freeze C. E. Elastic analysis for a radial crack in a circular ring. Eng. Frac. Mech, 1972, 4(2): 315 ~ 321
- [7] Clifton R. J, Simonson E. R, Jone A. H, et al. Determination of the critical stress intensity factor K_{Ic} from internally pressured thick - walled vessels. Experimental Mechanics, June 1976, 233 ~ 238
- [8] 刘洪, 符兆荣, 黄桢, 等. 水力压裂力学机理新探索. 钻采工艺, 2006, 29(3): 36 ~ 40
- [9] Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. New York, W. H. Freeman, 1982
- [10] 李传亮, 孔详言. 油井压裂过程中岩石破裂压力计算公式的理论研究. 石油钻采工艺, 2000, 22(2): 54 ~ 57
- [11] 阳友奎, 肖长富, 邱贤德, 等. 水力压裂裂缝形态与缝内压力分布. 重庆大学学报, 1995, 18(3): 20 ~ 26
- [12] 吴立, 阎天俊. 岩体爆破破碎过程中的分形效应. 凿岩机械气动工具, 2002, (3): 6 ~ 9

胜利油田砂砾岩储层压裂改造实践

孟庆民^{1,2} 张士诚¹ 陈培胜² 王磊² 张俊璟¹

(1 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室;

2 中国石化胜利油田分公司采油工艺研究院)

摘要:胜利油区砂砾岩体储量主要集中在东营、车镇凹陷北部陡坡带,储量丰富。砂砾岩体储层油藏具有低孔低渗、埋藏深、地层温度高、厚度变化大、岩性复杂、非均质性严重等特点,勘探开发难度大,使得储量未得到有效动用。针对砂砾岩储层的特点,探索了大型压裂、增能压裂、稠化酸压等压裂和酸压工艺,初步形成了针对不同砂砾岩储层的压裂配套技术。实践表明,形成的该项技术可以为砂砾岩储层的开发提供技术参考。

关键词:砂砾岩储层 水力压裂 酸压

1 胜利油区砂砾岩储层概况

国内外存在不少的砾岩、砂砾岩油藏。国内以新疆准噶尔盆地西北缘和克拉玛依油田为首,此外还有渤海湾盆地刘李庄砾岩油田、二连盆地蒙古林和夫特油田、南阳双河油田、胜利油田利津地区等。国外主要有加拿大西部盆地、阿根廷库约盆地、美国洛杉矶盆地、库克湾盆地和麦克阿瑟河油田赫姆洛克油藏等。我国砂砾岩油藏总体所占比例不高,但在部分地区所占比例较高,如在新疆砂砾岩油藏的个数占到了4590以上。而且其中绝大部分属于低孔低渗油藏,没有自然产能,需压裂后才能投产。

国内外针对砾岩、砂砾岩油藏的特性展开了大量的研究工作,主要集中于储层特征和开发过程中的渗流问题,但是国内外对于砂砾岩地层的增产措施方面的深入研究却相对较少^[1-4]。

自“九五”以来,随着对胜利油区东营、车镇凹陷北部陡坡带砂砾岩扇体地质认识程度的深入,找到了一大批优质储量,迄今已发现滨南、胜坨、盐家、富台、大王北等近20个油气田区块,但大批储量尚未得到有效动用。目前探明的砂砾岩体油气藏从储层特征上主要分两大类:碳酸盐岩砂砾岩和正常碎屑岩砂砾岩。砂砾岩体储层为多期快速沉积的产物,纵向上多期叠合,平面上向斜坡超覆,形成复杂的沉积格局,造成砂砾岩油藏厚度变化大,岩性复杂,岩相变化快,层间层内非均质严重,储层连通性差,直接影响该类型油藏的高效开发。

目前胜利油区砂砾岩油藏的开发存在很多问题:砂砾岩体储层展布规律、微观特征的认识不深;没有形成有针对性的油层保护和改造配套技术;油藏压裂改造后初期效果明显,但有效期短、产量下降快等。

作者简介:孟庆民,1974年生,中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事油气田开发理论与系统工程方面的研究,
E-mail:cupdocmeng@163.com。

2 砾岩储层开发过程中存在的矛盾

2.1 渗透率低,储层物性差

差盐 22、丰深地区、车 66 砂砾岩储层属于低孔、低渗—特低渗的储层。车 66 平均孔隙度 6.97%,平均渗透率 1.3mD。盐 22 块不压裂就没有产能。

2.2 储层非均质严重

车 66 块渗透率测试结果显示,层内、平面上渗透率极差大,非均质性强。

2.3 埋藏深,温度高

车 66 和丰深区块埋藏深,地层温度高(130~170℃)。普通的压裂液体系难以满足施工要求,应选择耐高温的压裂液体系。

2.4 砂砾岩体厚度较大,上下无明显隔层

盐 22 块有效厚度 86m,永 920 块有效厚度 80m。油层上下没有明显的隔层,不利于缝高控制。压裂施工规模小,则达不到压裂施工效果,不利于二次改造,需要尝试一种大规模压裂工艺。

2.5 碳酸盐含量较高,变化大

盐 22 块、车 66 块碳酸盐岩含量高,其中车 66 沙三段储层碳酸盐含量的变化在纵向、横向上差异较大,施工改造难度大。

2.6 弹性差别大,起裂复杂

车西北带砂砾岩体弹性模量在 20000~30000MPa,与正常砂岩体岩石偏高,储层较为致密。当砂砾岩含砾高、且砾石颗粒较大时,与正常岩体脆性破裂形态有显著区别,呈现沿轴向破裂形态,且破裂面极不规则(见图 1)。

2.7 储层具有一定的塑性,施工风险大

车 66 块应力—应变曲线出现短平台(见图 2),显示一定塑性,这与黏土含量较高有一定关系。岩石塑性造成液体滤失增大,发生砂堵的几率大。

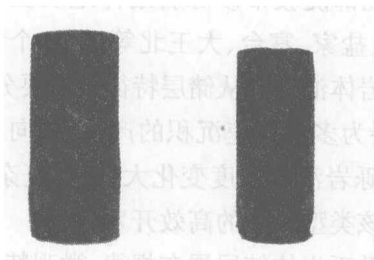


图 1 车 662 井岩心破裂实验试样

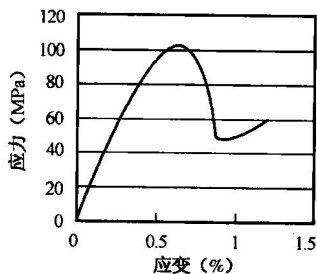


图 2 车 662 井应力—应变曲线

2.8 裂缝发育

丰深地区和车 66 块天然裂缝发育(见图 3),压裂过程中天然裂缝开启会导致压裂液滤失过大,更易于砂堵,须采取相应的降滤措施。

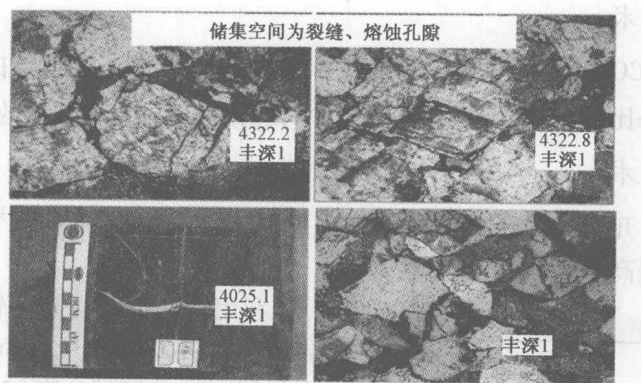


图3 丰深地区天然裂缝发育情况

3 主要工艺措施应用情况

3.1 胜利油区砂砾岩压裂简况

盐22块含砾砂岩油藏的改造,目前采用的前期暂堵和前置段塞技术。该块施工排量在 5m^3 左右,破裂压力在 60MPa 左右,延伸压力在 54MPa 左右,从施工压力上看,虽然该块井深(3500~4100m)而且斜度大,但是通过采取相应的措施,施工压力并不高,前置液所占比例在40%~50%。该块储层较厚,跨度大,而加砂规模相对较小,直接影响到了压裂效果。

丰深地区共施工3井4层,丰深1井效果较好。采用的主要工艺为粉陶降滤、增能助排、大规模压裂措施。

车66区块目前实施压裂试油2井次,酸压试油4井次,其中只有车660井4184.0~4205.4m通过酸压后获得了高产,其余5井次试油后均未获得工业油流。相对而言,加砂压裂改造效果好于酸压。从压后试油结果看,车663先稠化酸压后压裂,压裂后产能明显高于酸压效果;车662先压裂后稠化酸压,两种措施后产量变化不大;车73为乳化酸酸压,压后试油效果较差。压裂效果较好的原因在于,该区砂砾岩储层的砾岩成分虽然以碳酸盐岩为主,但泥质胶结充填,酸压施工时酸液主要与砾石进行反应,即使能够在砾石表面形成酸蚀刻槽也很容易被泥质充填,难以达到沟通孔道、保持酸蚀裂缝导流能力的目的。

3.2 高温压裂液体系

针对超深井高温的特点,开发了高温交联体系HTC-160。HTC-160高温交联剂可与水以任意比混溶,可与单元结构上含有顺式邻位羟基的水溶性天然植物胶及其改性产物在碱性条件下发生交联反应,形成高黏度冻胶体。HTC-160配制的压裂液除具有剪切恢复性好、延迟交联、自动破胶的特点之外,还具有抗高温的特征,其抗温能力可通过调整交联比进行调节,最高抗温能力 $140\sim 160^{\circ}\text{C}$;延迟交联时间 $40\sim 90\text{s}$ 。高温压裂液体系在 90°C 的条件下黏度保持在 $400\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上, 120°C 的条件下黏度保持在 $200\sim 300\text{mPa}\cdot\text{s}$, $140\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的条件下黏度保持在 $100\text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上。

合成该交联剂的原材料来源广、配制合成简便、放置稳定性好、现场应用可操作性强。该交联剂已在胜利、华东、华北等油田累积推广应用60口井以上,增产增注效果明显。

3.3 增能助排技术

丰深地区采用 CO₂ 或者 N₂ 进行助排。丰深 1 井压前 2.28t, 压裂后日产油 81.7t, 日产气 118336m³, 压裂效果比较显著。丰深 3 井采用 N₂ 助排, 两层施工压裂液的返排率达到 100%。

3.4 大型压裂技术

在盐 22-22 井开展了大型加砂压裂试验(见图 4), 加砂规模 89.5m³, 压后自喷有效期 57 天, 较常规压裂井提高了 1 倍, 累增油近 1000t。

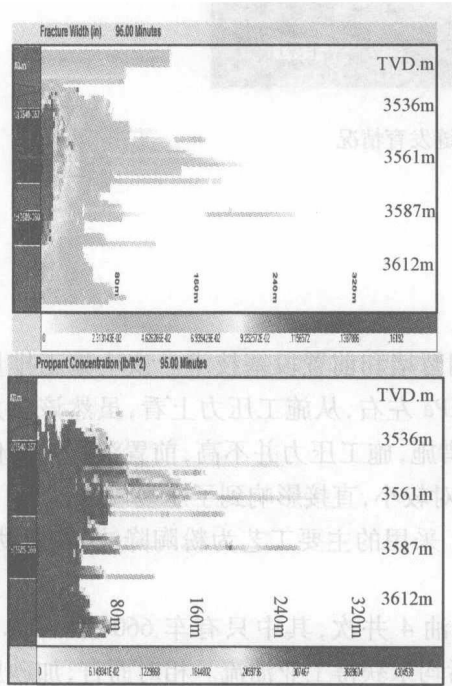


图 4 盐 22-22 井模拟裂缝形态

车 660 块井裂缝发育, 酸压沟通良好。施工采用常规酸—胶凝酸—HPG 交替—后置酸常规酸注入酸压方式。排量 1.4 ~ 3.9m³/min, 压力 54 ~ 65MPa。从酸压曲线看, 排量较稳定时, 施工压力有明显震荡, 酸压起到了良好的沟通效果。加之地层物性较好, 裂缝发育, 施工压力持续在较低水平。

利用全三维压裂设计软件 Gohfer2005, 模拟结果: 造缝井段 3520 ~ 3615m, 动态缝长 260m, 裂缝宽度 3.5mm, 裂缝高度 95m, 支撑缝长 160m, 铺砂浓度 5.34kg/m²。

3.5 酸压技术

对于车西砂砾岩储层, 通过酸压沟通裂缝是提高改善效果的关键。

在盐 22 块和丰深地区的改造过程中, 分别采用了小陶粒和粉陶进行降滤。盐 22 块采用的是 0.224 ~ 0.45mm 小粒径陶粒, 丰深地区采用 0.09 ~ 0.224mm 的粉陶进行降滤。

3.6 降滤措施

前置段塞使用小陶粒充分利用压裂过程中在高压条件下微裂缝开启的有利时机, 在对微裂缝暂堵降低滤失的同时, 又使天然裂缝能够得到支撑, 增加地层的渗流能力(见图 5)。

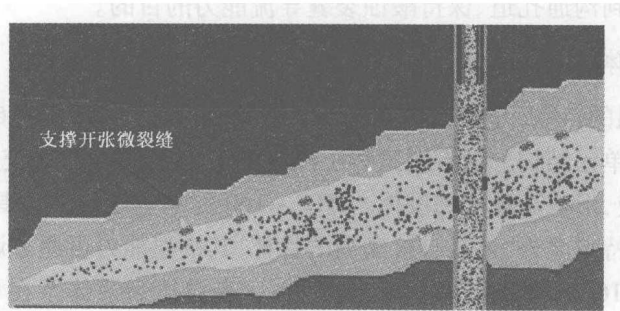


图 5 双重支撑工艺示意图

3.7 试井技术

压裂试井技术作为压裂效果分析手段, 在压后评估中得到广泛应用。通过试井技术, 可以

定量的评价裂缝形态和地层参数。

车 662 井压后综合测试曲线显示压裂已形成明显的人工裂缝(见图 6),形成了具有一定的导流能力,由于储层物性较差,且没有沟通裂缝带,因此在较短时间内地层压力减低较快导致供液不足。

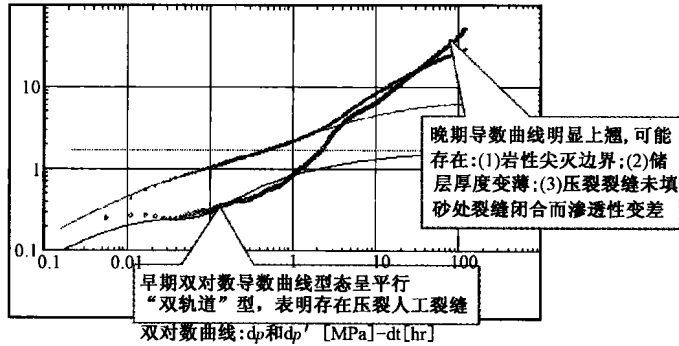


图 6 车 662 井压后试井分析

4 结论

(1) 胜利油区砂砾岩油藏储层物性差、非均质性强,矛盾突出,通过近两年来的探索和实践,初步建立了一套适合胜利油区砂砾岩的整体改造技术。

(2) 针对深埋高温的特点,开发研制了高温压裂液体系,可以满足 160℃ 地层的改造。

(3) 探索了砂砾岩岩性特性和起裂特点,在工艺上采用了降滤等措施,提高了压裂成功率。

(4) 综合开展了大型压裂、酸压、增能助排技术,实践证明了技术的可行性。

(5) 开展了压后试井分析,可有效评估压裂的效果。

参考文献

- [1] 孟祥燕,冉蜀勇,赵金洲等. 强水敏低渗砂砾岩油藏压裂技术应用研究. 钻采工艺,2007,30(4):53~55
- [2] 郑新权,戴平生. 大庆探区深层特殊岩性储层压裂改造技术. 油气井测试,2005,14(4):36~41
- [3] 王建栋. 塔河油田石炭系低孔低渗砂砾岩储层水力加砂压裂技术探讨. 石油钻探技术,2003,31(2):55~56
- [4] 冯兴凯,吴俊海,刘顺祥等. 二连探区太 39 井低孔特低渗砂砾岩油藏压裂技术的研究与应用. 油气井测试 2002,11(3):59~61
- [5] 吕传炳. 乌里雅斯太凹陷砂砾岩油藏储层改造理论与应用技术研究. 西南石油大学,2006
- [6] 梁兵. 乌里雅斯太凹陷砂砾岩油藏压裂关键技术研究与应用. 西南石油大学,2006

吉林油田地应力变化对重复压裂技术的影响

魏兆言

(中国石油吉林油田分公司采油工艺研究院)

摘要:本文对吉林油田地应力变化对重复压裂的影响及出现问题,从理论和矿场试验进行了分析和探讨,同时就低渗透油田重复压裂发展提出了一些看法及需注意的问题。压裂的裂缝方向取决于地层的应力状态。同样重复压裂也遵循着这样原则,研究重复压裂地应力场的变化是研究重复压裂机理基础。以前关于裂缝扩展的研究集中远井筒方面,对近井周围的应力状态研究不够。近几年在重复压裂现场实践中发现施工压力逐渐升高,在吉林油田部分区块都发现了这样现象,经过理论与现场实践的验证,已开发区块的层位地下应力场发生改变,引起施工压力升高。利用美国 Pinnacle 公司地面倾斜仪对两口井矿场测试验证,重复压裂裂缝是可以发生转向的。为老油田重复压裂提供重要的科学依据。

关键词:吉林油田 重复压裂 地应力

近几年压裂技术迅猛发展,但一些基础理论和现场施工问题一直困扰着压裂工程师们,已开发区块地应力改变多少?对压裂影响多大?岩石力学性质对重复压裂的影响几率多大?重复压裂裂缝是否发生转向,转向的条件和依据是什么?这些问题都亟待得到回答。

国内吉林、玉门、长庆、克拉玛依、大庆先后开展过以堵旧缝、压新缝为目的的同井同层重复压裂现场试验,部分油田取得了好的效果。但是,由于对水力压裂人工裂缝的转向机理及影响因素缺乏深入的研究,因此存在施工成功率低、增油机理说不清楚、应用范围小等问题。

众所周知,压裂的裂缝方向取决于地层的应力状态。同样重复压裂也遵循着这样原则,研究重复压裂地应力场的变化是研究重复压裂机理基础。以前关于裂缝扩展的研究集中远井筒方面,对近井周围的应力状态研究不够。近几年在重复压裂现场实践中发现施工压力逐渐升高,在吉林油田部分区块都发现了这样的现象,经过理论与现场实践的验证,已开发区块的层位地下应力场发生改变,引起施工压力升高。吉林油田利用美国 Pinnacle 公司地面倾斜仪对两口井矿场测试验证,重复压裂裂缝是可以发生转向的。为老油田重复压裂提供重要的科学依据。

1 重复压裂裂缝应力场分析

水力裂缝方向取决于地层应力状态,其裂缝几何形状受地层的岩石力学性质及压裂施工规模所控制。同样重复压裂也遵循着这样的一个原则,研究重复压裂的地应力场变化是研究重复压裂机理的基础。

1.1 储层就地应力场分析

一般情况下地层中岩石处于压应力状态,作用在其单元体上的应力为垂向主应力和水平主应力。

地下岩石应力状态:为三向不等压压缩状态。

作者简介:魏兆言,1963年生,高级工程师,主要从事压裂研究工作,E-mail:zywei666@yahoo.com.cn。