

文章编号: 1006-6616 (2015) 04-0546-09

碳酸盐岩酸压裂缝导流能力 随缝长变化规律研究

王玉芳¹, 杜建军², 牛新年³

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029;

2. 中国地质科学院地质力学所, 北京 100081;

3. 中石油塔里木油田测井中心, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 酸压裂缝的缝长和导流能力是评价酸化压裂效果的2个重要指标, 通过应用 FracproPT 软件对碳酸盐岩酸压过程中酸蚀裂缝导流能力和缝长变化趋势的拟合, 总结了碳酸盐岩油气藏不同储层类型中的裂缝导流能力随缝长的变化规律, 从裂缝导流能力随缝长的变化趋势中可以半定量判断碳酸盐岩储层中缝洞发育带的发育规模。拟合结果与地震和测井解释结果相结合, 对定性和定量判断碳酸盐岩缝洞发育体的规模具有重要意义。

关键词: 碳酸盐岩; 酸压; 裂缝导流能力; 裂缝缝长; 缝洞发育带

中图分类号: TE357

文献标识码: A

酸化压裂是碳酸盐岩油气藏提高采收率的重要措施, 酸压裂缝导流能力和酸压缝长是影响压裂效果的重要因素, 对储层改造后的高产稳产有重要的作用。国内外对酸蚀裂缝导流能力实验和根据实验推导的理论计算模型有很多^[1-20], 但对裂缝导流能力随缝长的变化规律还缺少研究。本文通过 FracproPt 软件对不同储层类型的碳酸盐岩酸压改造后裂缝导流能力随缝长变化关系进行了拟合分析, 总结了碳酸盐岩油气藏中基质孔隙型、裂缝孔洞型、裂缝型、孔洞型及溶洞型等不同类型储层的裂缝导流能力随缝长的变化规律。拟合结果与地震和测井解释结果对比结合, 可以定性和定量判断储层类型及缝洞发育体的规模。

1 FracproPT 软件中酸压裂缝导流能力模型

FracproPT 软件使用三维压裂裂缝几何形状模型确定酸液段在不断扩展的压裂裂缝内部的延伸, 每个段的酸消耗率被分别追踪, 岩石的累积溶蚀和相应的裂缝导流能力被作为压裂裂缝壁面上的分布状态来计算, 同时考虑了裂缝宽度上酸浓度的变化以及在特定酸消耗率条件下裂缝壁面处的酸反应速率。软件中采用了 Nierode-Kruk 关系式^[1]计算酸蚀裂缝导流能力。

Nierode-Kruk 方法^[1]通过实验预测酸蚀裂缝导流能力。在酸压过程中, 所溶解的岩石由

收稿日期: 2015-05-20

作者简介: 王玉芳 (1977-), 女, 山东临朐人, 硕士。主要从事油气藏工程及非常规油气资源调查及勘探等方面的研究。E-mail: 147444819@qq.com

理想裂缝宽度 (w_i) 表示 (w_i 定义为闭合之前的裂缝宽度)。如果所有的酸液进入裂缝并溶解裂缝表面的岩石 (例如无酸液滤失现象), 则理想的平均宽度为岩石溶解量除以裂缝面积或由下式表达:

$$w_i = \frac{XV}{2(1 - \phi)h_f x_f} \quad (1)$$

式中: w_i ——裂缝宽度, m; ϕ ——孔隙度, 无量纲; h_f ——裂缝高度, m; x_f ——裂缝长度的 1/2; V ——酸液注入量, m^3 ; X ——酸液溶解能力, g/100 g 水。

Nierode-Kruk 方法根据岩石埋藏强度、闭合应力及溶解的岩石体积预测裂缝导流能力。基于上述理想裂缝宽度公式, 用不同岩心做了大量实验, 得出酸压裂缝导流能力 (C_f) 公式:

$$C_f = C_1 e^{-C_2 \sigma_c} \quad (2)$$

$$C_1 = 1.47 \times 10^7 w_i^{2.47} \quad (3)$$

当 $S_{rock} > 137.9$ MPa 时:

$$C_2 = (13.9 - 1.3 \ln S_{rock}) \times 10^{-3} \quad (4)$$

当 $S_{rock} < 137.9$ MPa 时:

$$C_2 = (3.8 - 0.28 \ln S_{rock}) \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: S_{rock} ——岩石嵌入强度, MPa; C_f ——酸压裂缝导流能力, $10^{-3} \mu m^2 \cdot m$; σ_c ——闭合应力, MPa。

Beg 等^[21]也曾通过实验验证了该方法的准确性, 实验结果见图 1。

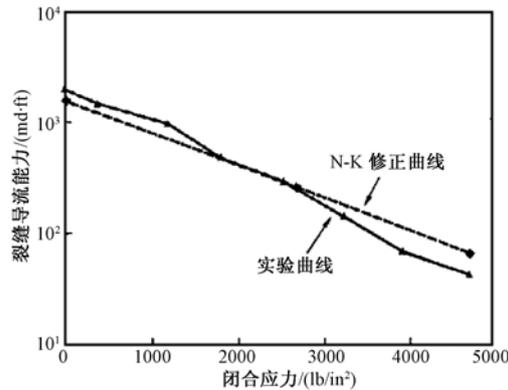


图 1 实验结果与 N-K 曲线对比

Fig. 1 Contrast between experimental result and N-K curve

岩心酸化在岩心室里进行, 酸化条件: 酸液在垂直裂缝中呈线性流动, 并且有酸液滤失现象; 然后对作为闭合应力函数的裂缝导流能力进行测量。结果发现, 增加酸液的接触时间有时会降低裂缝的导流能力, 酸液滤失会增加裂缝的导流能力, 因此 Nierode-Kruk 方法能准确预测岩石埋藏压力和闭合应力对酸压导流能力的影响。

FracproPT 软件在应用 Nierode-Kruk 方法计算酸压裂缝导流能力时将 Nierode-Kruk 预测公式整理为:

$$w_i = \frac{XV}{2(1 - \phi)h_f x_f}$$

$$C_f = 1.47 \times 10^7 \cdot w_i \cdot \exp[-(13.9 - 1.3 \ln S_{rock}) \times 10^{-3} \cdot \sigma_c] \quad S_{rock} > 137.9 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$C_f = 1.47 \times 10^7 \cdot w_i \cdot \exp[-(3.8 - 0.28 \ln S_{rock}) \times 10^{-3} \cdot \sigma_c] \quad S_{rock} < 137.9 \text{ MPa}$$

由上述公式可以看出,假设其他参数不变,在理想情况下,随着裂缝长度的增加,裂缝宽度变窄, C_f 值应该逐渐减小;当人工裂缝沟通储层的缝洞发育体后,储层的孔渗性能变好,相当于裂缝宽度变大。因此酸蚀裂缝导流能力 C_f 值与裂缝长度有关,同时也与人工裂缝沟通范围内储层的发育程度有关。

在酸蚀裂缝导流能力与缝长关系变化的拟合过程中,可以利用斜率突变的点进行储层缝洞发育体规模的判断。碳酸盐岩酸蚀裂缝导流能力是很难模拟计算的。通过宽度为 w 的通道的流速与 w^3 成正比,如果酸蚀通道不受力,这种比例关系可以用于计算酸蚀裂缝的导流能力。然而油藏中的地应力始终是使通道闭合。如果酸蚀非常均匀,则酸蚀裂缝的闭合可以按与椭圆裂缝缝宽计算相似的方法进行,只不过其中的净压力是负值。以上面论述为基础,利用酸压井拟合的酸蚀裂缝导流能力随缝长变化关系可以定量判断储层缝洞的发育规模,在酸蚀裂缝导流能力和缝长变化关系拟合曲线中,孔洞型储层和溶洞型储层的导流能力有异常现象,即导流能力减小的过程中出现拐点,下降的斜率减小甚至出现增大的现象。该方法与地震资料中串珠状反射是储层缝洞发育带相结合,可以定性和定量判断缝洞发育体的规模。

2 不同储层类型裂缝导流能力随缝长的变化规律

本文对大量碳酸盐岩储层酸压探井进行了压后拟合评价,归纳、总结、分析后发现,碳酸盐岩油气藏不同储层类型中的裂缝导流能力曲线随酸压裂缝缝长有一定的变化规律。

2.1 基质孔隙型

基质孔隙型储层中天然裂缝不发育,以基质孔隙为主。这类储层酸压裂缝导流能力的曲线拟合规律(见图2)是:酸压时支撑剂在铺置浓度的有效范围内,人工裂缝的导流能力下降较慢,支撑有效缝长较长,在人工裂缝末端导流能力下降很快;酸压形成的酸蚀裂缝在近井地带裂缝导流能力较大,远离井筒后呈凹形下降,酸蚀裂缝的有效缝长比支撑缝长短。

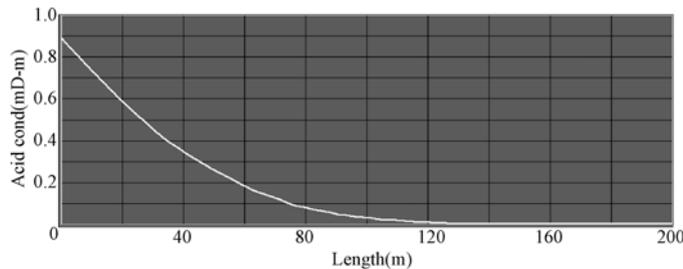


图2 XX1井6322~6415m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系(酸压)

Fig. 2 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and acid fracture length at 6322~6415m in the Well XX1

2.2 孔洞型

孔洞型储层中除了基质孔隙外还有部分小的溶孔,这类储层酸压的酸蚀裂缝导流能力随缝长变化曲线形态整体呈凹形,但在一定区域内导流能力随缝长变化有明显的拐点,曲线变化的斜率减小(见图3、图4)。

2.3 裂缝孔洞型

裂缝孔洞型储层中除了基质孔隙和小的溶孔外,还有天然裂缝发育。这类储层的酸蚀裂缝导流能力与缝长关系曲线以直线加凹型为主(见图5)。曲线形态与碳酸盐岩储层裂缝和

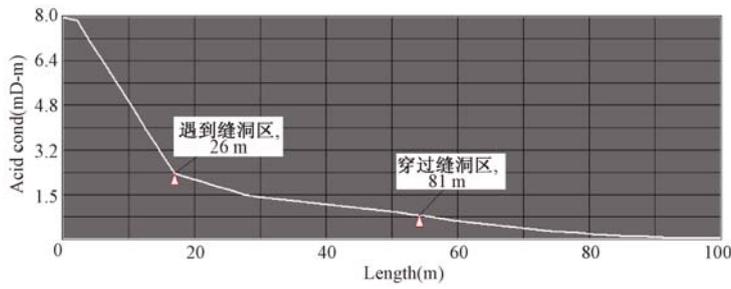


图3 XX2井6619~6645 m酸蚀裂缝导流能力与酸蚀缝长关系

Fig. 3 Relationship between acid etched fracture conductivity and fracture length at 6619 ~6645 m in the Well XX2

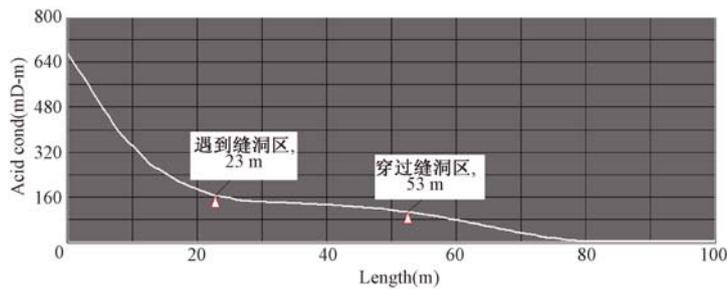


图4 XX3井5763~5770 m酸蚀裂缝导流能力与酸蚀缝长关系

Fig. 4 Relationship between acid etched fracture conductivity and fracture length at 5763 ~5770 m in the Well XX3

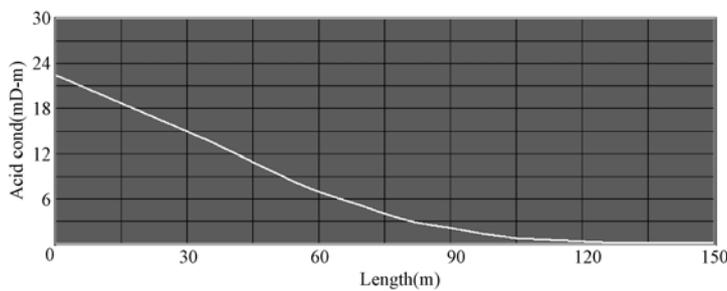


图5 XX4井6603~6619 m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系(直线型)

Fig. 5 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length at 6603 ~6619 m in the Well XX4

孔洞的发育程度有关。

2.4 裂缝型

裂缝型储层中天然裂缝发育。根据天然裂缝的发育程度和发育规模,裂缝型储层的酸蚀裂缝导流能力与缝长关系曲线形态大致分3种,分别为凹形、凸型和直线型(见图6—图8)。凹型曲线表明天然裂缝不太发育;直线型曲线表明近井地带的天然裂缝相对较发育,这与测井解释结果比较吻合;凸型曲线表明地层中天然裂缝比较发育,酸压滤失较大。

2.5 溶洞型

溶洞型储层中发育规模较大的溶洞。该类储层的酸蚀裂缝导流能力随缝长变化曲线多数在一定区域内导流能力随缝长呈凸型变化并有明显的拐点,曲线变化的斜率减小,甚至为水平段或增加(见图9、图10)。拟合发现溶洞发育位置与地震解释的结果非常吻合。

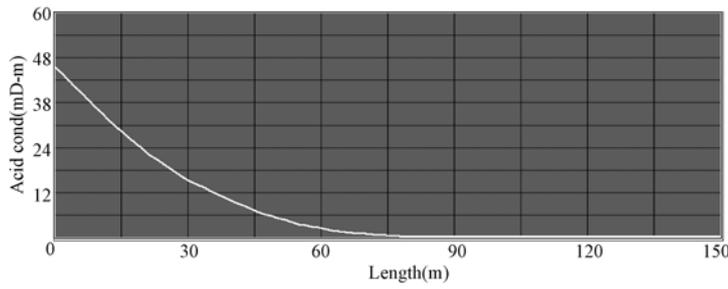


图6 XX5井5940~5960m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系(凹形)

Fig.6 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length at 6603~6619 m in the Well XX5

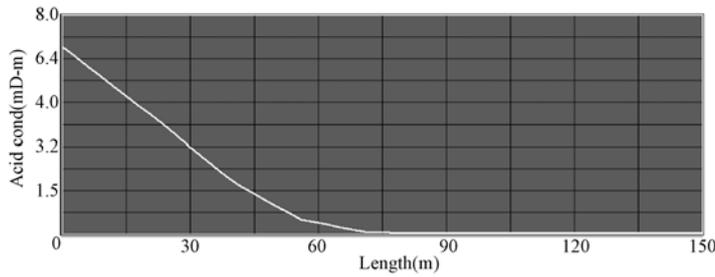


图7 XX6井6326~6370m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系(直线型)

Fig.7 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length at 6326~6370 m in the Well XX6

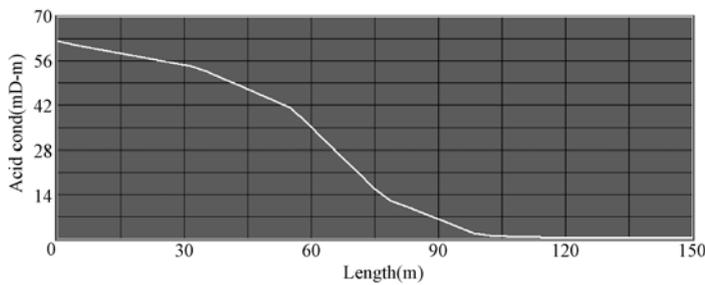


图8 XX7井5850~5920m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系(凸型)

Fig.8 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length at 5850~5920 m in the Well XX7

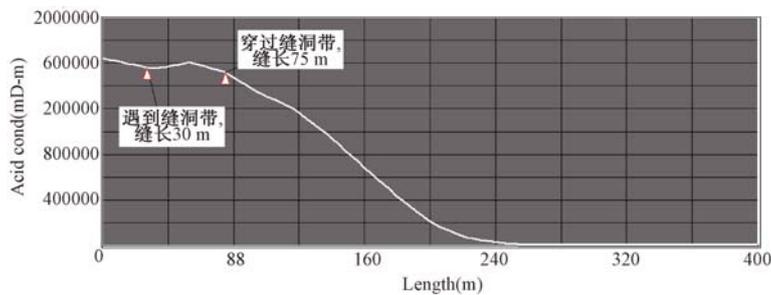


图9 XX8井6438~6448m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系

Fig.9 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length at 6438~6448 m in the Well XX8

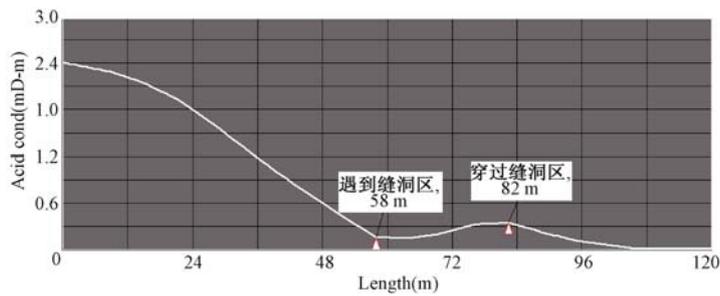


图10 XX9井5579~5630 m净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系

Fig. 10 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length at 5579 ~ 5630 m in the Well XX9

3 XX10井6785~6805 m酸压改造实例

通过酸压压后拟合评价,一方面可判断碳酸盐岩储层的类型,另一方面对裂缝孔洞发育带进行判断和定量分析,并结合测井与地震解释结果可进一步认识储层地质特征。

3.1 XX10井地质概况

XX10井所在地区断裂发育,以走滑断裂为主。该井位于3组(东西向、南北向、北东—南西向)走滑断裂的交汇区,一条南北向断裂从井旁穿过,断开层位从寒武系至石炭系,断距不大,延伸范围约6.0 km。该井东部斜坡带总体表现为一倾向南东的斜坡;井区奥陶系发育相对较全,主要为断裂与具有较强非均质性岩溶储层组成的复合圈闭。

XX10井不同目的层段的断裂组合及走向基本一致。储集空间为溶蚀缝洞,储集类型分为溶洞型、孔洞型、裂缝-孔洞型、裂缝型4种;横向呈层状展布,平面上广泛分布、连片发育。

3.2 XX10井地震解释

XX10井的井眼钻探在明显串珠反射上(见图11),井旁可能有大型溶洞发育。改造井段处距离串珠中心约50 m(见图12),同时最大地应力方向为北东—南西向,人工裂缝有利于沟通最有利储层。天然裂缝发育方向为北西—南东向,与最大主应力方向垂直,有利于沟通更多天然裂缝。

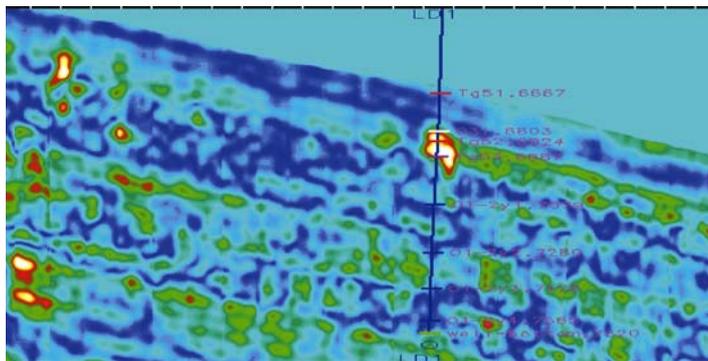


图11 过XX10井分频地震剖面

Fig. 11 Frequency division seismic section through the Well XX10

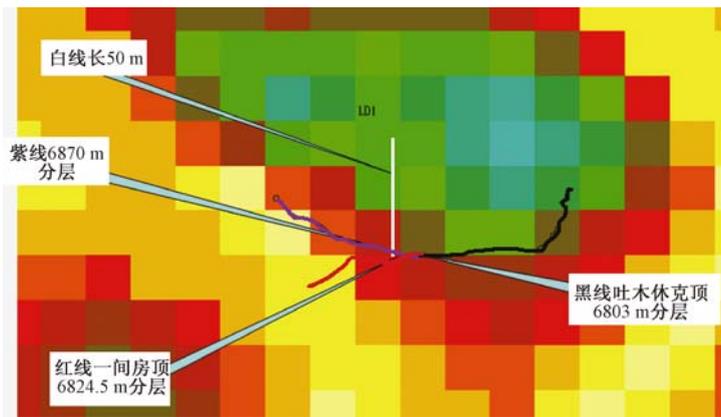


图 12 XX10 井物探平面属性图

Fig. 12 Geophysical exploration plane graph of XX10 well

3.3 酸压施工及酸蚀裂缝导流能力拟合结果

XX10 井酸压施工曲线见图 13，从中可以看出，前置液进入地层后，施工泵压出现了一个明显的下降，下降约 20 MPa，分析认为前置液沟通了缝洞系统。后期注入酸液的过程压力没有大的波动，但在注入未交联酸的 2 个阶段，由于未交联酸摩阻较大，压力实际上是下降的，地层进液并不困难，缝洞系统沟通较好。顶替阶段排量从 5.0 m³/min 下降到 2.4 m³/min 左右，压力上升约 5 MPa，分析认为主要是排量下降过快，裂缝内出现压力回传造成的。综上所述，从酸液进入地层开始，压力是持续下降的。

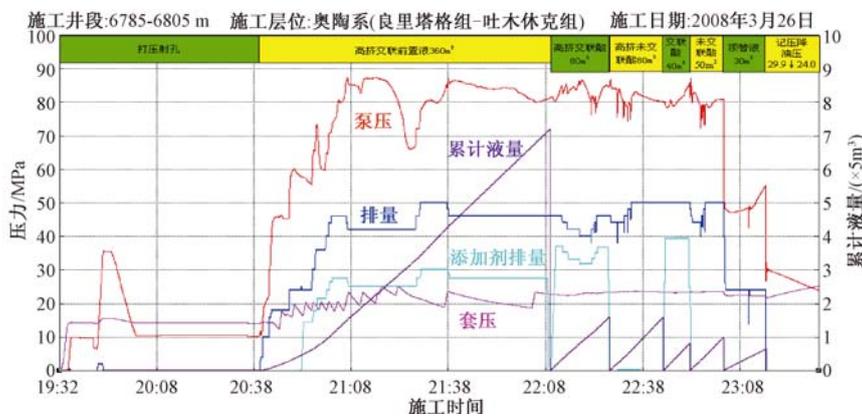


图 13 XX10 井 6785 ~ 6805 m 酸压施工曲线

Fig. 13 Acid fracturing curve at 6785 ~ 6805 m in the Well XX10

该层酸蚀裂缝导流能力和缝长关系拟合图见图 14，拟合储层发育带距井眼 43 m，与地震解释的 50 m 距离接近。人工裂缝延伸方向上从 43 ~ 105 m 酸蚀导流能力有异常，是储层发育带。

4 结论

碳酸盐岩基质孔隙型储层加砂压裂人工裂缝的导流能力下降较慢，支撑有效缝长较长，

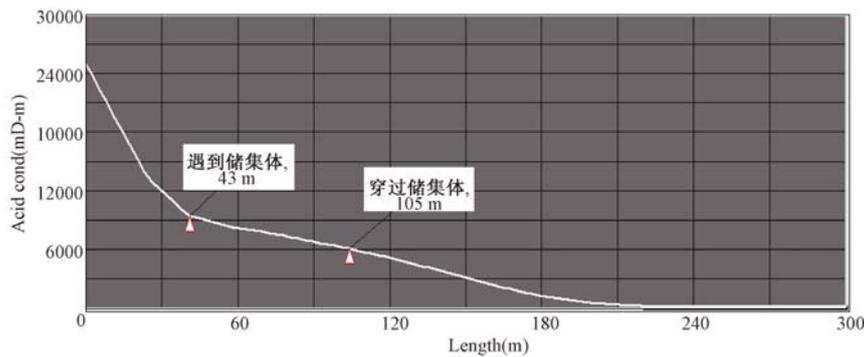


图 14 XX10 井净压力拟合裂缝导流能力与缝长的关系

Fig. 14 Relationship between net pressure fitting flow conductivity and fracture length in the Well XX10

在人工裂缝末端导流能力下降很快; 酸压形成的酸蚀裂缝在近井地带裂缝导流能力较大, 远离井筒后呈凹形下降, 酸蚀裂缝的有效缝长比支撑缝长短。

碳酸盐岩裂缝孔洞型和裂缝型储层的酸蚀裂缝导流能力与缝长关系曲线形态较复杂, 主要跟储层中天然裂缝的发育程度有关。

碳酸盐岩溶洞型和孔洞型储层的酸蚀裂缝导流能力随缝长变化具一定的规律性, 多数曲线在一定区域内导流能力有明显的拐点, 曲线变化斜率减小, 甚至为水平段或斜率增大, 认为该区域是孔洞型或溶洞型储层发育带。

通过对酸蚀裂缝导流能力随缝长变化趋势的拟合, 可以定性判断储层类型, 并半定量判断储层发育带的发育规模, 该方法与地震解释资料中串珠状反射是储层缝洞发育带相结合, 对定性和定量判断缝洞发育体的规模有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Nierode D E, Kruk K F. An evaluation of acid fluid loss additives, retarded acids and acidized fracture conductivity [J]. SPE4549, 1998.
- [2] Gangi A F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure [J]. Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1978.
- [3] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1981.
- [4] Tsang Y W, Witherspoon P A. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress [J]. Geophys Res, 1981.
- [5] Gong Ming. Mechanical and hydraulic behavior of acid fractures experimental studies and mathematical modeling [D]. Austin: The University of Texas, 1997.
- [6] Gong Ming, Lacote S, Hill A D. A new model of acid fracture conductivity [J]. SPE39431, 1998.
- [7] Gong Ming, Lacote S, Hill A D. New model of acid fracture conductivity based on deformation of surface asperities [J]. SPE57017, 1999.
- [8] Jianye M. Modeling acid transport and non-uniform etching in a stochastic domain in acid fracturing [D]. Texas: Texas A&M University, 2009.
- [9] Mou Jianye, Zhu D, Hill A D. New correlations of acid fracture conductivity at low closure stress based on the spatial distributions of formation properties [J]. SPE131591-PA, 2011: 195 ~ 202.
- [10] Mou Jianye, Zhu D, Hill A D. A new acid fracture conductivity model based on the spatial distributions of formation properties [J]. SPE127935, 2010.

- [11] Deng Jiayao. Mechanical behavior of small-scale channels in acid etched fractures [D]. Texas: Texas A&M University, 2010.
- [12] Deng Jiayao, Mou Jianye, Hill A D, et al. A new correlation of acid conductivity subject to closure stress [J]. SPE140402, 2011.
- [13] Flach T A. Creating and measuring acid fracture conductivity in the laboratory [D]. Austin: The University of Texas, 1997.
- [14] Malik M A. A new technique for laboratory measurement of acid fracture conductivity [J]. SPE19580, 1989.
- [15] 李年银, 赵立强, 张倩, 等. 酸压过程中酸蚀裂缝导流能力研究 [J]. 钻采工艺, 2008, 31 (6): 59~62.
LI Nian-yin, ZHAO Li-qiang, ZHANG Qian, et al. Study on acid etched fracture conductivity in acid fracturing [J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31 (6): 59~62.
- [16] 蒋卫东, 汪绪刚, 蒋建方, 等. 酸蚀裂缝导流能力模拟实验研究 [J]. 钻采工艺, 1998, 21 (6): 33~36.
JIANG Wei-dong, WANG Xu-gang, JIANG Jian-fang, et al. Simulation experimental research on acid-etched fracture conductivity [J]. Drilling & Production Technology, 1998, 21 (6): 33~36.
- [17] 王兴宏, 操红梅, 谢政, 等. 酸化压裂导流能力的系统实验研究 [J]. 国外油田工程, 2001, 17 (2): 6~9.
WANG Xing-hong, CAO Hong-mei, XIE Zheng et al. System experimental study on acid fracturing conductivity [J]. Foreign Oilfield Engineering, 2001, 17 (2): 6~9.
- [18] 程秋菊, 冯文光, 周瑞立. 酸蚀裂缝导流能力实验研究 [J]. 石油化工应用, 2011, 30 (12): 83~87.
CHENG Qiu-ju, FENG Wen-guang, ZHOU Rui-li. Experimental study on acid fracturing conductivity [J]. Petrochemical Industry Application, 2011, 30 (12): 83~87.
- [19] 李小刚, 杨兆中, 张俊良, 等. 酸压裂缝导流能力研究回顾与展望 [J]. 新疆石油地质, 2012, 33 (2): 241~243.
LI Xiao-gang, YANG Zhao-zhong, ZHANG Jun-liang, et al. Review and prospect of study on acid fracturing conductivity [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33 (2): 241~243.
- [20] 陈星宇, 杨兆中, 李小刚, 等. 酸蚀裂缝导流能力实验及预测模型研究综述 [J]. 断块油气田, 2012, 19 (5): 618~621.
CHEN Xing-yu, YANG Zhao-zhong, LI Xiao-gang, et al. Overview of study on experiment and predicting model of acid-etched fracture conductivity [J]. Fault-block Oil & Gas Field, 2012, 19 (5): 618~621.
- [21] Beg Mirza S, Kunak A Oguia. A system atic experimental study of acid fracture conductivity [J]. Austin: The University of Texas.

STUDY ON ACID FRACTURE CONDUCTIVITY WITH LENGTH VARIATION IN CARBONATE RESERVOIR

WANG Yu-fang¹, DU Jian-jun², NIU Xin-nian³

(1. Oil & Gas Survey, CGS, Beijing 100029, China;

2. Institute of Geomechanics, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. Logging Center of Tarim Oilfield Subdivision of CNPC, Kuerle 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the method of Nierode-Kruk theory, the change law between fracture conductivity and fracture length in different types of carbonate reservoir was obtained through fitting the change trend of the acid fracture conductivity with length variation, and the fracture-cave scale of the carbonate reservoir was semi-quantitatively determined based on this law. The fitting results combined with seismic and log interpretation has great significance on qualitative and quantitative judgment of the fracture-cave scale in the reservoir.

Key words: carbonate reservoir; acid fracture; fracture conductivity; fracture length; fracture-cave developed zone