

# 高闭合应力酸蚀裂缝导流能力实验研究

安娜, 张雄, 方裕燕, 焦克波

(中国石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 针对高闭合应力地层如何提高裂缝导流能力, 分别研究了酸液-岩石接触时间、酸液类型、闭合应力对导流能力的影响, 以及通过复合方式提高导流能力的措施。结果表明: 同样酸岩接触时间下, 半对数坐标中导流能力与闭合应力近似呈直线。高闭合应力下, 导流能力较低; 在低闭合应力下, 大粒径支撑剂酸蚀裂缝导流能力较高。高闭合压力下, 推荐 40/70 目陶粒。铺砂浓度越高, 导流能力越高, 酸蚀加砂是提高导流能力的措施之一。

**关键词:** 碳酸盐岩; 酸蚀裂缝; 导流能力; 高闭合应力

中图分类号: TE344

文献标识码: A

## Conductivity of acid etched fractures with high closure stress

An Na, Zhang Xiong, Fang Yuyan, Jiao Kebo

(Research Institute of Engineering Technology, SINOPEC Northwest Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** The article aims at a question that how to improve fracture conductivity with high closure stress. It researches the influences of contact time between acid and rock, types of acid, closure stress on conductivity respectively and how to improve conductivity by compound manner. It turned out that flow conductivity has a linear relationship with closure stress on semilog coordinate in same contract time between acid and rock, which means higher closure stress, lower flow conductivity. The experimental results also show that acid etching fracture has higher flow conductivity with big propping agent in low closure stress. It's more appropriate to choose propping agent from 40 to 70 mesh in high closure stress stratum, and the larger the sanding concentration, the higher the flow conductivity. Therefore, sanding in the acid etching stratum is one of the most effective means for improving flow conductivity.

**Key words:** carbonate rock; acid etched fracture; flow conductivity; high closure stress

在碳酸盐岩油气藏勘探开发过程中, 酸压是一项必不可少的增产措施, 而酸蚀裂缝导流能力是评价酸压效果的关键因素之一, 因此研究酸蚀裂缝导流能力对提高酸压效果有着非常重要的意义<sup>[1-3]</sup>。深井、超深井具有埋藏深、地层温度高、地层闭合应力高等复杂特征, 酸压中较难获得高导流能力。如何提高埋藏深、高温、高闭合应力、较长纯碳酸盐岩地层的酸蚀裂缝导流能力成为酸压改造的难题, 目前尚无此类储层提高导流能力的成功经验借鉴。因此本研究通过一系列酸蚀裂缝导流能力实验<sup>[4-6]</sup>, 研究酸液-岩石接触时间、酸液类型、闭合应力对导流能力的影响规律, 探索复合方式提高导流能力的途径。通过长期导流能力实验, 研究导流能力随时间变化规律, 为此类油藏酸压提供依据。

## 1 实验方法

本研究中测定酸蚀裂缝导流能力实验步骤如图 1 所示。

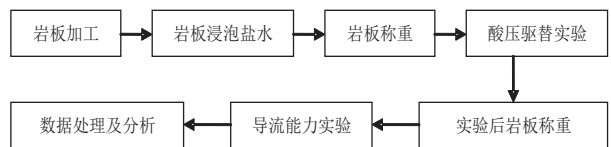


图 1 酸蚀裂缝导流能力实验步骤

Fig.1 Experimental steps of etched fracture conductivity

实验中的岩板采用经岩板加工厂加工的石板, 岩板槽中岩板之间距离设计为 8 mm, 相当于地层中裂缝的缝宽, 实验温度为 130 °C。实验中采用的酸液为稠化酸和交联酸, 酸液-岩石接触时间选取了 20, 40, 60, 80 min, 测量导流能力时闭合应力在 0~100 MPa 之间选取了 8 个点, 先通酸, 再测导流能力。

## 2 结果及分析

### 2.1 酸蚀裂缝导流能力影响因素研究

#### 2.1.1 酸-岩接触时间对酸蚀裂缝导流能力影响

在动态缝宽 8 mm, 温度 130 °C 条件下, 稠化酸

在酸-岩接触时间为 20,40,60,80 min 时不同闭合应力下的导流能力变化如图 2 所示。

在半对数坐标中导流能力与闭合应力近似成直线关系,导流能力随闭合应力下降很快,在高闭合应力下,导流能力较低。图 2 表明稠化酸酸-岩接触时间 20 min 时岩溶量较小,导流能力较低;当酸-岩接触时间高于 60 min 后,增加接触时间,导流能力不会成比例增加。60 min 与 80 min 酸-岩接触时间下导流能力接近,说明酸-岩接触时间达到一定值后,增加接触时间,导流能力不会相应增加。

### 2.1.2 酸液类型对酸蚀裂缝导流能力影响

酸液类型影响酸岩反应速度,研究不同类型酸液在不同酸-岩接触时间下的导流能力,有助于为不同类型酸液选择注入量(或注入时间)提供依据。动态缝宽 8 mm,温度 130 ℃,稠化酸和交联酸酸蚀裂缝导流能力变化对比如图 3 所示。

由图 3 可知,由于交联酸与岩石反应速度比稠化酸慢,同样酸岩接触时间下,交联酸导流能力更低。交联酸黏度高,滤失低,与岩石反应速度慢,有助于增加活酸作用距离,但是,要得到较高导流能力,需要更长的注入时间;稠化酸黏度低,滤失大,酸岩反应速度快,有助于增加导流能力,要得到较

长的活酸作用距离,需要增大排量。为增加酸的作用距离,得到较高的导流能力,可通过稠化酸与交联酸交替注入方式来实现。

## 2.2 复合导流能力实验研究

### 2.2.1 支撑剂尺寸对酸蚀裂缝导流能力影响

基于上述实验结果,选择 60 min 接触时间,选用 20/40,30/50,40/70,100 目的陶粒,铺砂浓度为 1.5 kg/m<sup>2</sup>,测定裂缝导流能力随闭合压力的变化,实验结果如图 4 所示。

由图 4 可知,有支撑剂时,导流能力随闭合应力下降相对缓慢,因为支撑剂起到支撑裂缝作用。在闭合应力低于 70 MPa 时,酸蚀加砂裂缝导流能力大小顺序关系是:陶粒 20/40>30/50>40/70>100 目;当闭合压力高于 70 MPa 时,30/50 目与 40/70 目支撑剂导流能力较接近,20/40 目支撑剂导流能力较低。原因是高闭合应力下支撑剂有嵌入,大粒径支撑剂更容易破碎,从而影响导流能力,考虑到施工中的加砂可操作性,高闭合应力下推荐 40/70 目支撑剂。

### 2.2.2 支撑剂铺砂浓度对导流能力影响

选择接触时间 60 min,40/70 目陶粒,铺砂浓度分别为 0.75,1.5,3,4,5 kg/m<sup>2</sup>,测定酸蚀裂缝导流能力随闭合压力的变化,研究支撑剂铺砂浓度对导流能力的影响,实验结果如图 5 所示。

图 5 表明,闭合应力低于 60 MPa 时,导流能力顺序为:铺砂浓度 0.75>1.5>3>4 kg/m<sup>2</sup>。分析其原因为:酸蚀裂缝导流能力主要由粗糙裂缝表面获得,支撑剂起到填充沟槽作用,所以,铺设浓度越低,导流能力越高;当闭合压力高于 60 MPa 时,导流能力顺序为:铺砂浓度 4>3>1.5>0.75 kg/m<sup>2</sup>,在高闭合压力下,裂缝表面变形严重,支撑剂起到支撑裂缝作用,所以,铺砂浓度越高,导流能力越高,且在高闭合压力下,1.5,3,4 kg/m<sup>2</sup>导流能力相差

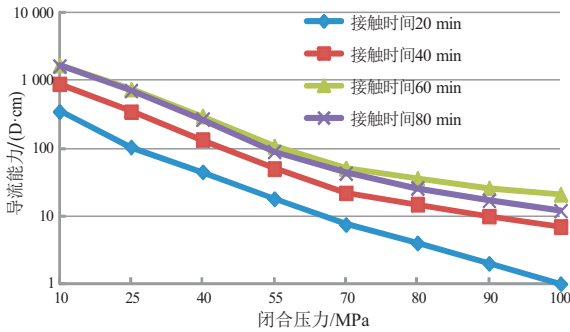


图 2 稠化酸酸蚀裂缝导流能力变化

Fig.2 Acid etched fracture conductivity changing with gelled acid

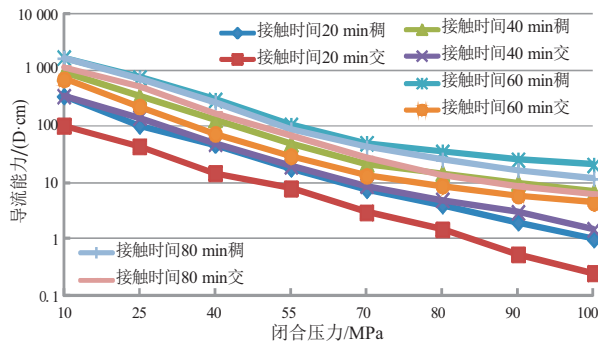


图 3 稠化酸和交联酸酸蚀裂缝导流能力变化

Fig.3 Changing curves of acid etched fracture conductivity with gelled acid and crosslinked acid

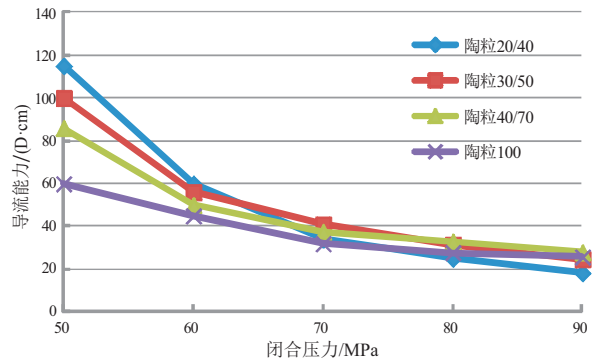


图 4 不同尺寸陶粒下酸蚀裂缝导流能力变化

Fig.4 Curves of acid etched fracture conductivity on ceramsite with different dimensions

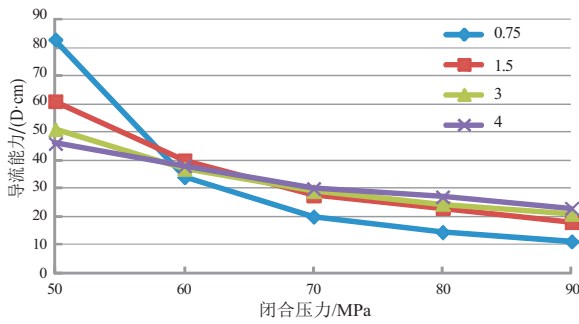


图 5 不同铺砂浓度下酸蚀裂缝导流能力变化  
Fig.5 Curves of acid etched fracture conductivity with different concentration of sanding

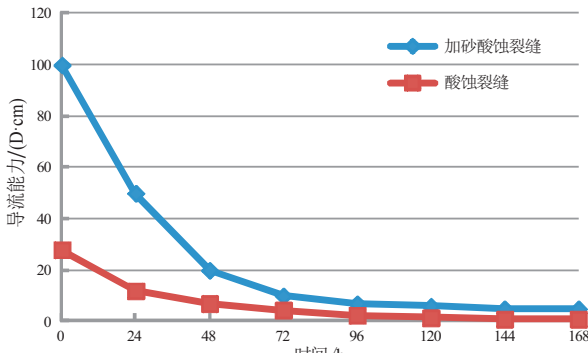


图 6 酸蚀加砂裂缝与酸蚀裂缝长期导流能力对比  
Fig.6 Curve comparison of acid etched fracture conductivity with sanding and acid fracture

不大,因此优选 1.5~3 kg/m<sup>2</sup> 的铺砂浓度。

### 2.3 长期导流能力实验研究

酸蚀加砂裂缝长期导流能力与酸蚀裂缝长期导流能力对比如图 6 所示。

图 6 表明在高闭合应力下,酸蚀加砂裂缝在初期和稳定期的导流能力均比不加砂时导流能力高,可知复合酸压是提高导流能力的措施之一。

### 2.4 裂缝导流能力对产量的影响

导流能力对酸压增产效果有显著影响,通过油藏数值模拟分析了导流能力对产能的影响(图 7)。用 ECLIPSE 建立了油藏数值模拟模型,600×600 m,双重介质,裂缝孔隙度和渗透率分别为 1.5% 和 0.5×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,基质部分孔隙度和渗透率分别为 1.5% 和 0.026×10<sup>-3</sup> μm<sup>2</sup>,裂缝长度选取 140 m,导流能力变化值为 0.1~50 D·cm,累生产时间为 3 a。

从图 7 可以看出,导流能力较低时,增加导流能力,产量显著提高;当导流能力高于 20 D·cm 时,增加导流能力,产量增加幅度很小;10 D·cm 与 20 D·cm 导流能力下的产量差较小。

长期导流能力实验结果表明,在 50 MPa 闭合应力下,酸蚀裂缝长期稳定导流能力能达到 15 D·cm,可满足产能对导流能力的要求;而在 70 MPa 闭合应力下,长期稳定导流能力只有 4 D·cm,低于产能对导流能力的要求。酸蚀加砂裂缝长期导流能力实验数据表明,在 70 MPa 闭合应力下,导流能力达到 10 D·cm,可达到产能对导流能力的要求。这说明对高闭合应力储层,酸蚀加砂是增加导流能力、满足产能对导流能力要求的措施之一。

## 3 结论

(1) 130 °C 条件下,稠化酸 60 min 接触时间达到导流能力上限。导流能力随闭合应力下降快,在半对数坐标中导流能力与闭合应力近似直线,在高闭合应力下,导流能力较低。

(2) 低闭合应力下,大粒径支撑剂酸蚀裂缝导流能力更高;高闭合压力下,大粒径的支撑剂更容易破碎,对于高闭合应力地层,推荐 40/70 目陶粒;铺砂浓度越高,导流能力越高,铺砂浓度需参照施

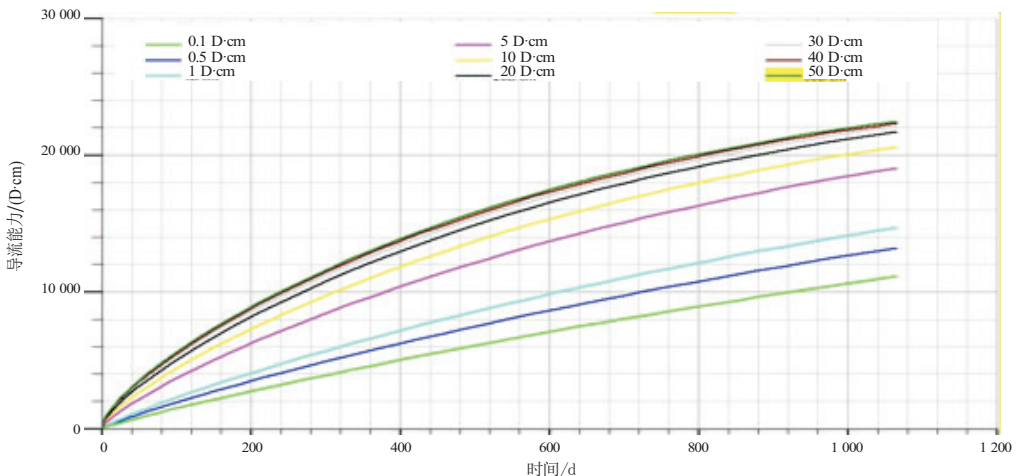


图 7 导流能力对累积产油量影响  
Fig.7 Impact of conductivity on cumulative crude oil production

了管道内穿插 HDPE 管防腐修复技术,提高管内壁的抗腐蚀强度,并定期扫线,及时发现管线内壁的薄弱区域,使该管线能在安全范围内正常运行。

## 4 结论

(1)该油田计转站外输埋地管线发生穿孔事故的主要风险因素有腐蚀、第三方损伤、误操作、设计、管道初始缺陷等。由于该管线处于沙漠边缘,发生泥石流、滑坡、洪水等自然灾害的几率小,故在这3年内未统计到由于自然灾害造成的管道穿孔事故。

(2)运用事故树分析法统计,得到造成该段穿越河道管线穿孔事故的主要基本事件为腐蚀事件,其中主要以内腐蚀为主,其中内腐蚀又主要由于输送介质中的水对管道内壁造成腐蚀。

(3)根据该管段发生穿孔事故的各项因素的概率,对该油田单位提供了指导性意见,以便对管线采取相应的防护措施,以保证管线的正常运行。

### 参考文献:

[1] 张世翔,章言鼎. 青岛输油管道泄漏爆炸事故分析与整改建

议[J]. 工业安全与环保,2014(12): 89-91.

[2] 王玉算. 危险化学品事故应急救援机制研究[D]. 泉州:华侨大学, 2015.

[3] 孙伟博,李华,蒲子芳,等. 从青岛、大连两起输油管道爆炸事件谈陆地溢油应急处置[J]. 环境工程,2015(S1): 883-886.

[4] 张树才,牟善军,赵勇,等. 风险评估和事故调查改进探讨:青岛“11·22”输油管道爆炸事故反思[J]. 安全、健康和环境, 2015(12): 7-10.

[5] 张媛媛,王敏,卢宏伟,等. 青岛黄潍输油管道泄漏爆炸事故溢油风化规律[J]. 环境化学,2015(9): 1741-1747.

[6] 赵东风,陈爽,赵志强,等. 基于脆弱性的油气管道风险评估及其应用[J]. 中国安全科学学报,2014(7): 57-62.

[7] 戚建刚. 解析“11·22”青岛输油管道爆炸事件中的六类违法行为[J]. 法学杂志,2014(6): 37-43.

[8] 王毅辉,李勇,蒋蓉,等. 中国石油西南油气田公司管道完整性管理研究与实践[J]. 天然气工业,2013(3): 78-83.

[9] 辛颖,王岩. 基于作业条件危险性分析的集输站场模糊风险评估[J]. 化学工程与装备,2015(4): 211-214.

[10] 张照鸿. 延长气田集输管道的事故分析及风险评估[D]. 西安:西安石油大学, 2014.

[11] 蒋宏业. 油田联合站风险评估技术研究[D]. 成都:西南石油学院, 2004.

[12] 王明凤. 集输场站量化风险评估应用研究[D]. 武汉:长江大学, 2012.

[13] 辛颖,王岩. 油气集输站场实时风险预警评价体系研究[J]. 中国安全科学学报,2013(5): 151-155.

(编辑 叶德燎)

(上接第 152 页)

工能实现的加砂浓度。

(3)对比酸蚀裂缝与酸蚀加砂裂缝长期导流能力可知在高闭合应力下,酸蚀加砂裂缝导流能力更高,说明携砂酸压是提高导流能力的措施之一。

(4)当导流能力低于 10 D·cm 时,导流能力对产能影响较明显;当导流能力高于 20 D·cm 时,导流能力对产能影响微弱;50 MPa 闭合应力时,酸蚀裂缝能满足导流能力要求;70 MPa 闭合应力下,酸蚀加砂裂缝能满足导流能力要求。

### 参考文献:

[1] 李富俊,张焯. 复合酸压工艺技术在塔河油田的研究与应

用[J].天然气勘探与开发,2010,33(4): 73-76.

[2] 黄霞,程礼军,李克智,等. 川东北地区碳酸盐岩储层深度酸压技术[J].天然气与石油,2012,30(3): 40-44.

[3] 程伙菊,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,2012,30(12): 83-87.

[4] 牟建业,张士诚.酸压裂缝导流能力影响因素分析[J].油气地质与采收率,2011(2): 69-71.

[5] 姜浒,陈勉,张广清,等.碳酸盐岩储层加砂酸压支撑裂缝短期导流能力试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009(4): 89-92.

[6] J Deng, Jianye Mou, A D Hill, et al. A new correlation of acid fracture conductivity subject to closure stress[J]. SPE 140402, 2011.

(编辑 叶德燎)