

DOI: 10.11779/CJGE201802021

酸液预处理对深部裂缝性页岩储层压裂的影响机制

谭 鹏¹, 金 衍¹, 韩 玲², 单清林¹, 张亚坤³, 陈 刚¹, 周英操⁴

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与工程国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司石油工程技术研究院, 湖北 武汉 430000; 3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术公司, 天津 300452; 4. 中国石油钻井工程技术研究院, 北京 100195)

摘 要: 深层裂缝性页岩油气藏具有高温、高应力、高破裂压力以及低渗透的特点, 极大提高了现场压裂施工难度, 如何有效改善近井筒岩石学性质及降低施工压力是安全高效压裂的关键。从岩石力学性质的影响因素入手, 分析了酸化过程中酸与矿物的化学反应, 从宏观和微观两方面阐述了酸液预处理改善近井筒岩石性质、降低破裂压力的力学机理。选取川东南地区龙马溪组页岩露头开展真三轴水力压裂物理模拟试验, 采用酸液预处理压裂试件的裸眼井段, 分析酸岩反应对水力裂缝起裂及扩展规律的影响。试验结果表明, 酸液浸泡裸眼井段能够显著降低页岩破裂压力, 酸岩反应会引起天然裂缝面性质的变化, 容易导致近井筒附近复杂多裂缝的形成; 裂缝扩展穿透酸化区时会引起二次憋压, 酸化区内的天然裂缝越发育, 酸岩反应越剧烈, 近井筒裂缝形态越复杂, 压裂曲线波动越频繁。室内试验和现场施工结果吻合程度良好, 证实了通过酸液预处理提高深部页岩地层改造效果的有效性。

关键词: 深部页岩; 高温; 高应力; 酸化; 裂缝扩展

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)02-0384-07

作者简介: 谭 鹏(1990-), 湖北荆州人, 男, 博士研究生, 主要从事非常规油气藏岩石力学相关方面的研究。E-mail: tanpeng09jy@163.com。

Influencing mechanism of acidification pretreatment on hydraulic fracture for deep fractured shale reservoirs

TAN Peng¹, JIN Yan¹, HAN Ling², SHAN Qing-lin¹, ZHANG Ya-kun³, CHEN Gang¹, ZHOU Ying-cai⁴

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China; 2. Petroleum Engineering Technology Research Institute, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan 430000, China; 3. CNOOC EnerTech—Drilling & Production Co., Tianjing 300452, China; 4. CNPC Drilling Engineering Research Institute, Beijing 100195, China)

Abstract: Due to the characteristics of high temperature, high stress and low permeability deep fractured shale reservoirs, great difficulties are aroused to hydraulic fracture treatment. Therefore, How to improve the rock properties near the wellbore and to reduce the treatment pressure is the key to hydraulic fracturing safely and efficiently. The influencing factors of rock mechanical properties and reaction between hydrochloric acid and shale are analyzed firstly, and then a series of macroscopic and microscopic experiments are conducted, explaining the mechanical mechanism of acidification pretreatment to improve the rock properties near the wellbore and to reduce the decreasing breakdown pressure. Subsequently, true triaxial hydraulic fracturing experiments are performed on the shale specimens collected from Longmaxi in the southeast of Sichuan Basin. The influences of acidification pretreatment on fracture initiation and propagation are investigated by soaking the open-hole section of shale specimens using hydrochloric acid. The experimental results show that the initiation pressure decreases sharply after acidification, and acidification reaction changes the properties of natural fracture surface, resulting in the formation of a complex fracture geometry near the wellbore. Besides, the pump pressure rises for the second time after hydraulic fracture extends through acidification region. The complicated natural fractures near the wellbore promote acid-rock reaction, contributing to forming a complex geometry and fluctuating the fracturing curve frequently. The good match between the indoor experiments and the on-site treatment indicates that it is effective to improve the reconstruction effects of deep shale reservoirs by acidification.

Key words: deep shale; high temperature; high in-situ stress; acidification; fracture propagation

0 引 言

当今油气资源量短缺, 开发深部页岩油气藏对改

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(51490650)

收稿日期: 2016-11-14

善国家能源结构具有重要意义,但在开发过程中遇到了很多问题^[1-4]。深层页岩油气藏的特点是储量丰度低,物性差,自然产能低,生产成本高,增产难度大,大多属于难动用油气藏,在勘探评价和开采过程中,这类油气藏储集层需要通过大型水力压裂才能达到工业产能^[5-6]。由于异常高压高温、超低孔低渗的地质特点给压裂施工带来了极大困难,施工时井口压力过高,往往超过井口、井下工具承压极限而无法正常施工^[7]。因此,如何有效改善近井筒岩石学性质及降低地层破裂是安全压裂的关键。

地层破裂压力主要受井周应力场和岩石结构控制,因此要降低地层破裂压力,需要改变井筒附近应力状态或岩石自身性质。目前,油田现场常通过射孔来改变井周应力场以降低破裂压力,国内外学者从理论分析^[8-9]、数值模拟^[10-12]以及室内试验^[13-14]对射孔参数优化开展了大量的研究。酸液预处理技术则通过改变岩石本身的力学参数、矿物组分以达到降压的目的,由于其工艺简单、见效快的优点被广泛使用^[15-17]。与常规储层不同,页岩储层发育大量天然裂缝、层理、节理等不连续间断面,采用酸液预处理页岩储层,酸液不仅与页岩基质颗粒反应,还会改变这些间断面壁面性质,在降低地层破裂压力的基础上,会严重影响水力裂缝的起裂方向及近井筒裂缝形态。基于此,本文从酸液与页岩反应出发,研究酸液对页岩基质及天然弱面性质的改变,从宏观和微观两方面分析酸液预处理改善近井筒岩石性质、降低破裂压力的力学机理,最后选取川东南地区龙马溪组页岩露头开展真三轴水力压裂物理模拟试验,研究酸液预处理裸眼井壁后页岩水力压裂裂缝起裂及扩展特征,并基于室内试验模拟结果,提出相关施工建议。

1 酸液与页岩作用机理

页岩是由基质及裂隙组成的双重介质。基质颗粒主要由石英、长石以及云母3种矿物组成,颗粒间通过胶结物连接,胶结类型主要分为钙质胶结、泥质胶结和硅质胶结3种。页岩孔隙和裂缝是地下流体的储集空间和运移通道,裂缝中通常由填充物填充,并具有一定的胶结强度。酸液主要通过和岩石中的矿物成分以及胶结物发生反应,降低内聚力和内摩擦角,从而降低了岩石的破裂压力和裂缝胶结强度,引起多裂缝的产生。

1.1 酸岩反应

龙马溪组页岩矿物组分为石英、正长石、斜长石、方解石、白云石、黄铁矿和黏土。石英、斜长石和黏土的含量比较大,超过了10%,其中脆性较大的石英、

斜长石、白云石的总量在60%以上,容易水化膨胀的高岭石和蒙脱石含量很低,但中间夹杂着少量的伊/蒙混层,这导致地层脆性较大^[18]。针对龙马溪组页岩的矿物成分,酸岩反应主要有如下几种形式(本文中均以盐酸与岩石的反应为例进行分析):

方解石与酸反应方程式为



白云岩与酸反应方程式为



黄铁矿与酸反应方程式为



图1为页岩岩心与盐酸反应过程,页岩浸入酸液后,迅速反应产生大量气泡,液体最终逐渐变成黄绿色,并产生少量页岩残渣沉淀物。酸岩反应后,通过溶解岩石内部的长石、钙质、泥质等可溶矿物,改变岩石本身的各矿物含量,并产生一些粒间孔和晶体溶孔,增加岩石孔隙的同时,一定程度上增加了岩石微裂缝的连通性,改善裂缝面性质,降低了岩石的强度。如图2所示,页岩浸泡表面被腐蚀,柱体表面粗糙度增加,出现明显的分层条纹,并显示大量的微裂缝。

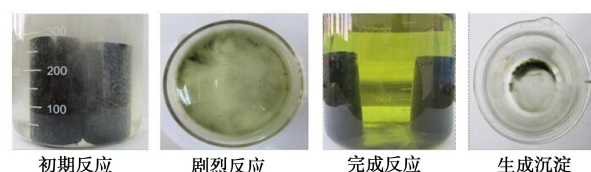


图1 酸岩反应过程

Fig. 1 Process of acid-rock reaction

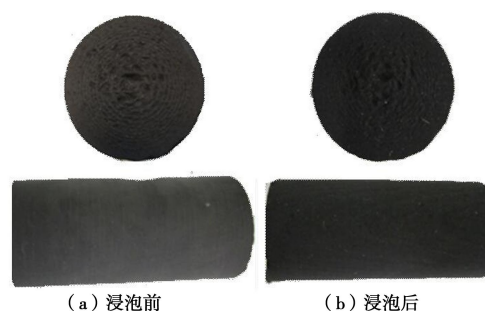


图2 酸处理前后试件表面变化情况

Fig. 2 Variation of specimen surface before and after acidification

1.2 酸预处理微观试验

为对比酸化前后页岩矿物组分发生的变化,设置9组试验进行X射线衍射全岩分析,观察泡酸前和泡酸后矿物含量的变化,试验中酸浓度为20%,浸泡时间为3h,分析结果如表1所示。

XRD(即X-ray diffraction)衍射试验表明,盐酸

与岩石中的石英、钾长石、斜长石和黏土矿物基本没有反应，反应后百分比增加是因为岩样总量减少，而单种矿物量没有变化。主要反应矿物是方解石和白云石，反应相对来说很强烈，且反应量很大，另外黄铁矿也几乎完全反应。

表 1 XRD 矿物组分分析数据表

Table 1 Data of whole rock X-ray diffraction		矿物含量/%						TCCM
样品号	酸化	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	
1	否	29.0	—	5.1	21.2	16.9	4.1	22.8
2	否	38.5	—	4.3	24.3	17.8	3.0	12.1
2a	是	39.2	—	4.9	22.5			33.4
3	否	30.0	—	1.1	20.2	25.9	7.1	15.7
3a	是	32.3	—	0.8		25.2		41.7
4	否	29.0	—		22.0	26.6	5.3	17.1
5	否	32.1	—	4.9	21.8	14.5		23.2
5a	是	43.4	0.9	5.4			3.5	47.2
6	否	31.6	0.5	0.8	23.3	28.3	1.5	15.5
6a	是	53.5	—	1.8				44.7
7	否	13.9	—	1.6	38.0	27.2	12.4	6.9
8	否	10.5	—	0.9	44.6	36.9		7.1
8a	是	66.8	—	5.1				28.1
9	否	14.4	—	1.5	36.8	26.4	11.9	6.0
9a	是	64.8	—				1.8	27.2

注：样品号后面有“a”与没有“a”取自于相同岩芯，区别在于是否泡酸。

为直观展示酸液处理前后页岩矿物的变化情况，设置 3 组试验进行酸化前后的电镜扫描分析。图 3 为酸化前后黄铁矿的变化，酸化前（左图）黄铁矿呈颗粒状，粒径较大，酸化后（右图）变成分散状的单晶黄铁矿。图 4 为酸化前后晶间孔隙的变化情况，酸化前（左图）晶间孔隙在 0.3 μm 左右，酸化后（右图）平均孔隙尺寸增大到 5 μm 左右。图 5 为酸化前后沿晶裂缝宽度变化图，酸化前（左图）裂缝宽度在 1.2 μm 左右，酸作用后（右图）由于裂缝面上的方解石、白云石晶体与酸液反应，裂缝宽度变大（2.3 μm 左右），微裂隙相互连通变长。电镜扫描分析与 XRD 衍射分析结果相一致，二者从微观上反映了酸岩反应前后岩石矿物组分以及微裂隙结构的改变。

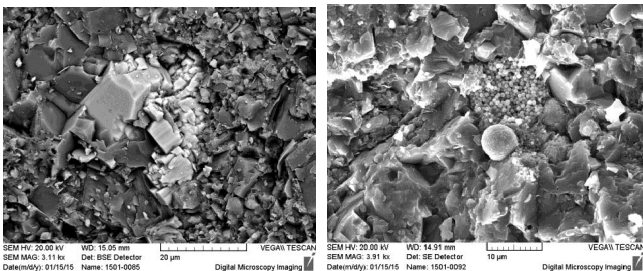


图 3 酸化前后黄铁矿的变化示意图

Fig.3 Variation of pyrite before and after acidification

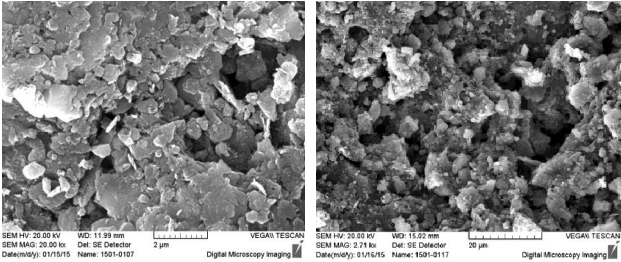


图 4 酸化前后晶间孔隙变化图

Fig. 4 Variation of intergranular micropore before and after acidification

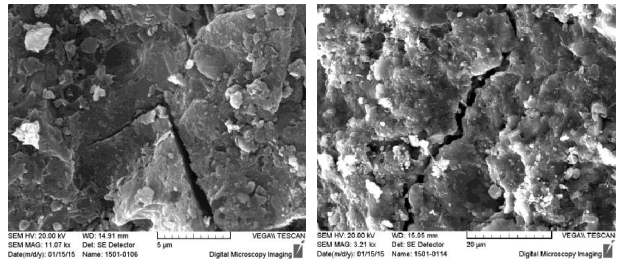


图 5 酸化前后沿晶裂缝变化图

Fig. 5 Intergranular crack width before and after acidification

1.3 酸预处理后岩石力学参数试验

为考察酸液预处理对页岩宏观力学性质的影响，设置 4 组试验，测试在一定盐酸浓度下浸泡一定时间后页岩的抗压强度、弹性模量和泊松比的弱化程度。试验中围压设置为 20 MPa，盐酸浓度为 20%，浸泡时间为 3 h，测试结果如图 6 所示。

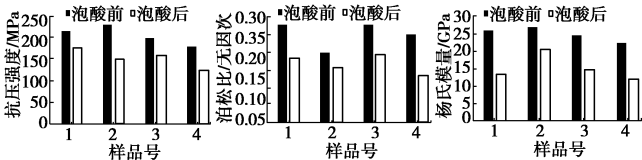


图 6 酸处理前后岩石力学参数对比图

Fig. 6 Comparison among mechanical parameters of rock before and after acidification

试验结果表明，页岩与盐酸作用后抗压强度、杨氏模量以及泊松比都降低了，抗压强度降低 17.5%~30.7%，杨氏模量降低 24.6%~48.7%，泊松比降低 22.2%~47.1%。分析原因认为，这主要是由于酸液与页岩矿物中的钙质、泥质等胶结物反应，改变了岩石的成分、结构以及颗粒间的作用力，导致岩石的孔隙度增加，变得松散脆弱。泡酸前后的典型破裂模式如图 7 所示，结果显示，浸酸岩心产生分层的条纹裂缝，但没有明显张开裂缝，岩心端部破碎程度高，未浸酸的岩心只形成单一剪切缝。

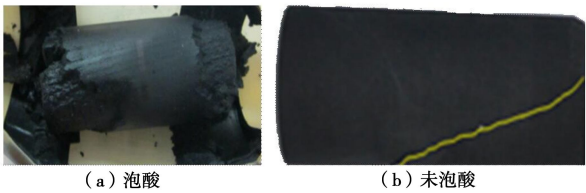


图 7 三轴试验压后裂缝形态

Fig.7 Fracture geometry after triaxial tests

2 真三轴水力压裂模拟试验

2.1 试验方案

为考察酸化后页岩的宏微观性质的变化对水力压裂裂缝起裂及扩展的影响, 采用大尺寸真三轴水力压裂模拟试验系统和 MTS 伺服增压系统^[19]对龙马溪组页岩露头开展水力压裂试验。四川盆地下志留统龙马溪组某井压裂施工, 改造层段深度为 4375.74~4415.97 m, 地应力测试结果为: 平均垂向应力梯度 97.05 MPa, 平均水平最大应力 83.51 MPa, 平均水平最小应力 78.26 MPa, 岩石基质弹性模量 36.5 GPa, 泊松比 0.25。龙马溪组页岩露头参数如下: 弹性模量为 40 GPa, 泊松比为 0.18。所切割成的岩石试样尺寸为 300 mm×300 mm×300 mm 正方体岩块, 切割过程中保证层理面平行于端面以保证与真实的沉积过程一致。随后, 在正方体岩块一面中心处钻孔, 用高强度固结胶将井筒黏结在钻孔内, 模拟裸眼完井。最终形成试件的示意图如图 8 所示。

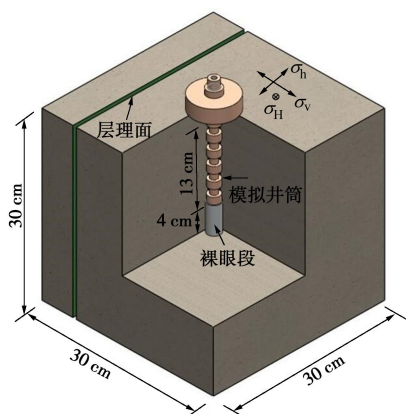


图 8 试件示意图

Fig. 8 Schematic drawing of specimen

依据上述基本数据, 根据相似准则^[20]计算得到试验参数: 垂向地应力 25.6 MPa, 水平最大地应力 19.4 MPa, 水平最小地应力为 15.3 MPa。试验中为模拟酸液与岩石的作用, 采取的方法是, 在模拟井筒固结完成之后, 向裸眼段注入浓度为 20% 的盐酸溶液, 浸泡时间为 3h, 后在井眼内保留一部分盐酸作为前置酸进行水力压裂试验。试验参数设置如表 2 所示。

表 2 试验参数

Table 2 Parameters for hydraulic fracturing						
试样 编号	围压/MPa			注入排量 /(mL·min ⁻¹)	压裂液黏度 /(mPa·s)	是否 泡酸
	σ_v	σ_H	σ_h			
1	25.6	19.4	15.3	20	2	否
2	25.6	19.4	15.3	20	2	否
3	25.6	19.4	15.3	20	2	是
4	25.6	19.4	15.3	20	2	是

2.2 试验结果分析

共开展 4 块页岩露头的压裂试验, 前两块未对裸眼段酸化处理, 后两块经过泡酸处理, 压前试件的裂缝分布情况如图 9 所示。

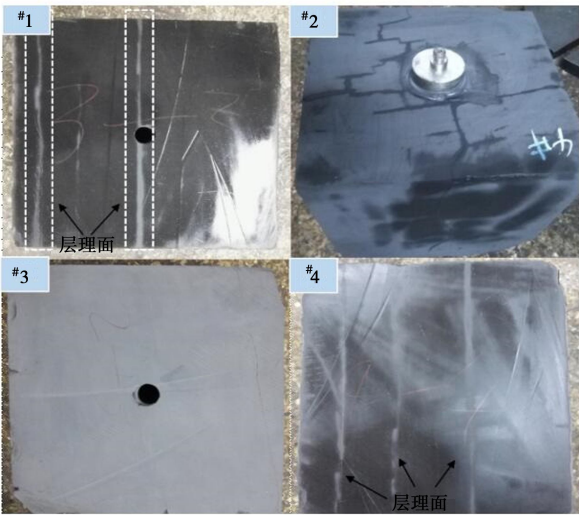


图 9 压前页岩试件裂缝形态

Fig.9 Fracture geometry of shale outcrops before fracturing

由图 9 所示, #1, #2, #4 试件层理发育, 并存在很多微小天然裂缝, #3 试样非均质性相对较弱, 表面无明显天然裂缝。酸液作用后, 这些发育的弱面对水力裂缝的起裂和扩展产生显著的影响。试件压后裂缝形态如图 10 所示, 图中 HF 为水力裂缝, BP、BP1、BP2 为层理面。

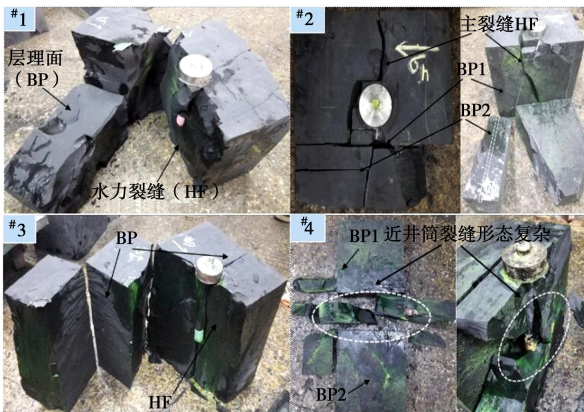


图 10 压后页岩试件裂缝形态

Fig.10 Fracture geometry of shale outcrops after fracturing

由图 10 所示压后裂缝形态可知, 在发育层理等弱面的页岩试样内, 泡酸与否对水力裂缝起裂及扩展形态具有显著影响。#1 试样和 #2 试样在近井筒附近均存在一条层理缝, 水力裂缝几乎垂直穿透层理面, 沿层理面打开未发现压裂液痕迹; #3 试样不发育天然裂缝, 压后形成单一主水力裂缝; #4 试样在井筒两侧分别发育一条平行的层理缝, 且近井筒天然裂缝发育, 压后水力裂缝充分沟通这些天然裂缝, 导致近井筒破碎严

重，扩展至两侧层理面时裂缝止裂。

基于酸岩反应原理，酸液沿近井筒天然裂缝渗滤后，裂缝中的酸溶蚀性矿物被消耗，天然裂缝面的摩擦特性发生改变，由天然裂缝界面的剪切滑移判别准则 $\tau=\mu_f\sigma_n$ （ σ_n 为作用在界面上的有效法向应力， μ_f 为天然裂缝界面摩擦系数）可知，天然裂缝界面的摩擦系数对水力裂缝的扩展路径影响很大，在远场地应力和天然裂缝产状不变的情况下，摩擦系数越小，剪切滑移越可能发生，天然裂缝越容易开启，因此，界面摩擦系数可从微观上影响水力裂缝的走向。影响界面摩擦系数的因素有很多，如裂缝界面的胶结强度、裂缝开度及填充物、近裂缝面的岩性等。酸岩反应能够有效降低近井筒附近裂缝面的界面摩擦系数，降低裂缝面的胶结强度，促进微裂隙相互连通，从而增加水力裂缝与天然裂缝的沟通几率（如图 5 所示）。试验中 #1 试样和 #2 试样裸眼段未泡酸，水力裂缝直接穿透近井筒层理面，这与天然裂缝的良好胶结及垂直裂缝面上的高应力有关。与之对比的 #4 试件是水力裂缝充分沟通近井筒天然裂缝的情况，这主要是由于酸液的作用，井壁附近岩石力学效应不断弱化，天然裂缝面系数不断变小，从而导致水力裂缝沿天然裂缝扩展，造成分支缝及多裂缝的形成，然而，这些近井筒复杂的裂缝形态将会引起严重砂堵，增加施工泵压，降低压裂成功率。#3 试件近井筒裂缝相对不发育，酸液预处理裸眼段后，在近井筒仅形成单一裂缝，对比 #4 试件说明天然裂缝的发育程度是能否产生复杂多裂缝的前提条件。因此，油田现场在进行酸化改造时，应该遴选裂缝发育、品质高的页岩层段施工，尽可能在远离井筒的区域产生复杂缝网，避免近井筒出现多裂缝影响支撑剂运移。同时，需要对酸液类型、酸液量、酸浓度等参数进行合理优选，防止酸岩反应导致岩石的有效孔隙度过度增加，出现岩石骨架垮塌、影响压裂效果的现象。

最后，对各压裂试件的压裂曲线进行分析，如图 11 所示。结果表明，未经过酸液预处理裸眼段的 #1 试样和 #2 试样的破裂压力很高，岩石憋压破坏后压力释放，存在明显的破裂压力峰值；酸液浸泡后的 #3 试样和 #4 试样的破裂压力显著降低，且压力降较小、破裂压力峰值不显著。结合酸岩作用机理可知，反应后近井筒岩石的孔隙度和渗透性增加，岩石的力学性质以及胶结强度得到不同程度的削弱，较低泵注压力即可致裂岩石，待水力裂缝扩展穿透酸化区后，岩石的强度增加，裂缝继续扩展会造成二次憋压，且压力值一般会大于岩石的起裂压力。以 #3 试样为例进行说明。a—b 表示随着压裂液的不不断注入，憋压导致井筒内压力持续增大，当液压升到第一个峰值 b 时，井筒裸眼

段开始破裂。b—c 表示水力裂缝在酸化区内扩展，当液压升到第一个峰值 c 时，裂缝扩展至酸化区域的边界，憋压并发生二次破裂。c—d 表示裂缝向前平稳扩展，压裂液沿着主裂缝向试样端面稳定滤失。#4 试样由于近井筒天然裂缝异常发育，压裂曲线波动剧烈，与压后复杂的裂缝形态相吻合（图 10），也体现了酸岩反应的剧烈程度。

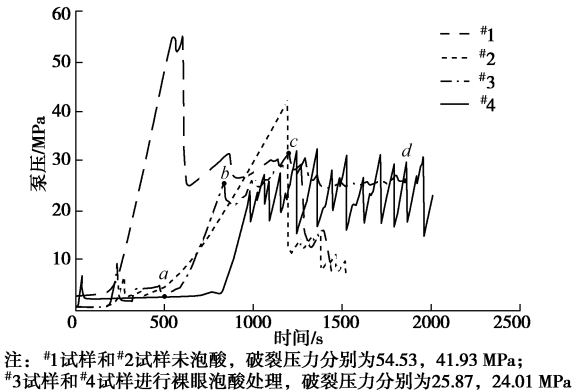


图 11 压裂曲线

Fig. 11 Fracturing curves

吴亚红等^[21]采用盐酸预处理查干凹陷苏一段某口井的井下岩心，研究发现采用酸液的浸泡 2 h 后测得杨氏模量明显的小于没有酸浸泡的杨氏模量。同时分别在盐酸体系和土酸体系下进行了岩心溶蚀试验（见表 3），试验表明，酸液通过与胶结物的反应，降低了胶结强度，从而降低了岩石的内聚力和内摩擦角，验证了通过酸液预处理目的层段降低破裂压裂的有效性。

表 3 目的层段岩心溶蚀试验

Table 3 Core dissolution experiments on target formation

岩心编号	酸液类型	试验条件		溶蚀率/%
		温度/℃	时间/h	
2/38-1	20%HCL	60	4	8.16
2/38-2	20%HCL	60	4	7.31
2/38-3	15%HCL+3%HF	60	4	10.07
2/38-4	15%HCL+3%HF	60	4	8.60

3 现场验证

西部某深井采用前置液+TCA 酸压改造，改造井段 5806.96~5890.00 m，施工过程中泵压为 14.0~86 MPa，排量为 0.9~5.97 m³/min，注入地层液体 648 m³，施工曲线见图 12。

从压降曲线分析，前置液随着 TCA 酸液的注入，酸液进入地层后有明显的压降响应，裂缝延伸压力降低，可促进水力裂缝与天然裂缝的沟通，增大储层的有效改造体积。该井酸压改造后通过 5 mm 油嘴放喷求产，油压 13~14 MPa，油日产油 169.15 m³，折日产气 14360 m³，相比同层段未改造的邻井，产量明显

- 压力的数值模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2011, **41**(3): 219 - 226. (BIAO Fang-jun, LIU He, ZHANG Jin, et al. A numerical study of fracture initiation pressure under helical perforation conditions[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2011, **41**(3): 219 - 226. (in Chinese))
- [11] 王志军, 连传杰, 王 阁. 岩石定向水力压裂导控的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 320 - 324. (WANG Zhi-jun, LIAN Chuan-jie, WANG Ge. Numerical analysis of guide control of directional hydraulic fracturing of rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 320 - 324. (in Chinese))
- [12] 刘志远, 陈 勉, 金 衍, 等. 泥夹层对巨厚砂泥互层储层一体化压裂的影响[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(9): 34 - 38. (LIU Zhi-yuan, CHEN Mian, JIN Yan, et al. The effect of argillaceous interlayers on integrative fracturing of sandstone-mudstone interbedding reservoir with huge thickness[J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14**(9): 34 - 38. (in Chinese))
- [13] 姜 沛, 陈 勉, 张广清, 等. 定向射孔对水力裂缝起裂与延伸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(7): 1321 - 1326. (JIANG Hu, CHEN Mian, ZHANG Guang-qing, et al. Impact of oriented perforation on hydraulic fracture initiation and propagation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(7): 1321 - 1326. (in Chinese))
- [14] 侯 冰, 陈 勉, 刁 策, 等. 砂泥交互储层定向井压裂裂缝穿层扩展真三轴实验研究[J]. 科学技术与工程, 2015, **15**(26): 54 - 59. (HOU Bing, CHEN Mian, DIAO Ce, et al. True Triaxial experimental study of hydraulic fracture penetrating sand and mud interbedding in deviated wellbore[J]. Science Technology and Engineering, 2015, **15**(26): 54 - 59. (in Chinese))
- [15] 侯 冰, 谭 鹏, 陈 勉, 等. 致密灰岩储层压裂裂缝扩展形态试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 219 - 225. (HOU Bing, TAN Peng, CHEN Mian, et al. Experimental investigation on propagation geometry of hydraulic fracture in compact limestone reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 219 - 225. (in Chinese))
- [16] LI G S, SHENG M, TIAN S C, et al. Multistage hydraulic jet acid fracturing technique for horizontal wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, **39**(1): 107 - 112.
- [17] BYBEE K. Acid Fracturing a carbonate reservoir[J]. Journal of Petroleum Engineers, 2004, **56**(7): 49 - 52.
- [18] 刘 洪, 陈 乔, 王 森, 等. 渝东南下志留统龙马溪组页岩矿物成分及脆性特征实验研究[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(29): 8567 - 8571. (LIU Hong, CHEN Qiao, WANG Sen, et al. Experimental study of mineral composition and brittle characteristic in longmaxi formation of lower silurian, Southeast Chongqing[J]. Science Technology and Engineering, 2013, **13**(29): 8567 - 8571. (in Chinese))
- [19] ZHOU J, JIN Y, CHEN M. Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**(7): 1193 - 1199.
- [20] 柳贡慧, 庞 飞, 陈治喜. 水力压裂模拟实验中的相似准则[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, **24**(5): 45 - 48+6-5. (LIU Gong-hui, PANG Fei, CHEN Zhi-xi. Development of scaling laws for hydraulic fracture simulation tests[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, **24**(5): 45 - 48+6-5. (in Chinese))
- [21] 吴亚红, 李明志, 张 劲, 等. 查干凹陷苏一段储层提高压裂效果技术研究与应用[J]. 钻采工艺, 2016, **39**(3): 60 - 63. (WU Ya-hong, LI Ming-zhi, ZHANG Jin, et al. Research and application for fracturing technology of volcanic reservoir in Chagan Depression[J]. Drilling & Production Technology, 2016, **39**(3): 60 - 63. (in Chinese))