

# 碳酸盐岩储层酸压室内真三轴物理模拟实验

王焱钊<sup>1,2</sup>, 侯冰<sup>1,2\*</sup>, 张鲲鹏<sup>1,2</sup>, 周长林<sup>3</sup>, 刘飞<sup>3</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249

3 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司工程技术研究院, 成都 610017

\* 通信作者, houbing@vip.163.com

收稿日期: 2019-08-26

国家自然科学基金项目(51874328, U1762215, U19B6003-05), 中石油科技创新基金(2018D-5007-0307)资助

**摘要** 不同储集类型碳酸盐岩的水力裂缝扩展模式有差异, 现有研究对酸压条件下裂缝型和缝洞型碳酸盐岩破裂模式认识不清, 无法有效增加裂缝复杂度, 提高采收率。采用裂缝型和缝洞型的碳酸盐岩进行室内真三轴酸压物理模拟实验, 运用3D断面扫描观察裂缝面粗糙程度, 分析对比两者破裂形态、裂缝起裂模式、扩展规律及泵压曲线特征。实验结果表明: (1) 两种碳酸盐岩中的天然弱结构都能诱导天然裂缝扩展, 作用模式有差异: 水力裂缝在缝洞型碳酸盐岩中主要受孔洞的诱导形成树枝状蚓洞群, 在裂缝型碳酸盐岩中主要依靠通过开启原有的天然裂缝向前延伸, 形成交叉型裂缝。(2) 缝洞型碳酸盐岩破裂压力较低, 曲线受孔洞影响, 出现二次波动; 裂缝型碳酸盐岩破裂压力较高, 曲线仅出现一次波动, 压力下降更快。(3) 裂缝型碳酸盐岩中酸液与基质作用区域主要集中在井眼附近, 其余部位蚀刻效果不明显, 酸液沿裂缝产生漏失; 缝洞型碳酸盐岩中, 酸液与基质的作用区域更大: 近井筒处断面蚀刻程度最深, 弱化效果最好, 随着距井筒距离增加, 弱化效果逐渐减弱。(4) 对比裂缝型碳酸盐岩在滑溜水压裂、酸液压裂、泡酸条件下的泵压曲线, 酸液压裂降低破裂压力效果最明显, 优于泡酸处理, 滑溜水压裂破裂压力最高。泡酸条件下, 酸液腐蚀裸眼段, 降低壁面强度; 酸压条件下, 酸液主要沿着裂缝路径与岩石作用, 弱化作用更明显。针对不同储集类型碳酸盐岩, 即使施工工艺相同、地应力相同, 仍然会获得不同的压裂效果, 实验结果将对碳酸盐岩储层现场酸压工艺的改进提供指导。

**关键词** 酸压; 碳酸盐岩; 储集空间; 裂缝扩展; 3D扫描

## Laboratory true triaxial acid fracturing experiments for carbonate reservoirs

WANG Yizhao<sup>1,2</sup>, HOU Bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Kunpeng<sup>1,2</sup>, ZHOU Changlin<sup>3</sup>, LIU Fei<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Engineering Research Institute, Southwest Oil & Gas Field CoMPany, PetroChina, Chengdu 610017, China

**Abstract** Carbonates with different reservoir space types have different hydraulic fracture propagation modes. But there is poor understanding of the fracture characteristics of fractured and fracture-cavity carbonates. It is difficult to effectively increase the complexity of fractures and increase the recovery rate under acid fracturing conditions. Fractured and fracture-cavity type carbonate rocks were used to implement laboratory true triaxial acid fracturing, and a 3D profile scanning method was applied

引用格式: 王焱钊, 侯冰, 张鲲鹏, 周长林, 刘飞. 碳酸盐岩储层酸压室内真三轴物理模拟实验. 石油科学通报, 2020, 03: 412-419

WANG Yizhao, HOU Bing, ZHANG Kunpeng, ZHOU Changlin, LIU Fei. Laboratory true triaxial acid fracturing experiments for carbonate reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2020, 03: 412-419. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.035

to observe the roughness of the fracture surface. The geometry of hydraulic fractures, fracture propagation, and characteristics of the pump-pressure curves were analyzed. Experimental results have shown: (1) Whether it was fracture-cavity type or fractured type carbonate, the natural weak structure (fracture or holes) in the matrix had played a positive role in inducing the extension of artificial fractures. The different natural weak structures led to different fracturing: fracture-cavity carbonate was more likely to form single fractures; fractured type carbonate was more likely to form complex cross-type fractures. (2) Fractured-cavity carbonate rocks had lower fracture pressure and secondary fluctuation emerged in the curve, which was greatly affected by the cavities. Fractured carbonate rocks had higher fracture pressure, only one fluctuation occurred, and the pressure dropped faster. (3) The region acid worked on was different. In fracture carbonate, acid dominantly migrated around the wellhead with slight etching in other regions, and leaked along the cracks. Conversely, in fracture-cavity carbonate, acid migrated across a wider area: the section near the wellbore had the deepest etching degree and the best weakening effect, as the distance from the wellbore increased, the weakening effect gradually reduced. (4) Pump-pressure curves under the conditions of slick water fracturing, acid fluid fracturing and slick water fracturing after acid etch were compared. For carbonate, acid fracturing had the most obvious effect on reducing fracture pressure, which was better than acid soaking treatment, while slick water fracturing had the highest fracture pressure. Using acid immersion treatment, acid would erode the open-hole section, which reduced rock strength. Using acid hydraulic fracturing, the acid fluid mainly interacted with carbonate rocks along the fracture path, when weakening effect was more obvious than in immersion treatment. For the fracturing of carbonate with different reservoir types, even using same construction parameters and under same in-situ stress conditions, different fracturing effects would still be obtained. The results of experiments could explain the different carbonate's fracture modes, and effectively instruct the improvement of the on-site carbonate acid fracturing process.

**Keywords** acid fracturing; carbonate reservoir; reservoir space; fracture propagation; 3D scanning

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2020.03.035

## 0 引言

碳酸盐岩是指矿物成分中碳酸盐矿物含量占据一半以上的沉积岩<sup>[1]</sup>。我国碳酸盐岩储集的地区地质条件比较复杂<sup>[2]</sup>,构造运动较活跃,同时由于含油气地层多为奥陶系等埋藏较深的地层<sup>[3]</sup>,温压条件较高,导致碳酸盐岩储层中裂缝、溶孔、洞等结构较发育<sup>[4]</sup>。

各种成岩作用导致碳酸盐岩储层中的孔隙等不连续结构较复杂。国外学者J.Motyka等<sup>[5]</sup>指出,在碳酸盐岩储层中有三种储集空间:孔型,裂缝型、洞型,建立了碳酸盐岩储层中缝网的概念模型。在我国,张希明<sup>[6]</sup>按照油气储集空间将其分为3种类型:基质孔隙(基质型)、溶蚀孔洞(缝洞型)、大型洞穴、裂缝(裂缝型)。其中:(1)基质孔隙(基质型)一般直径仅为几微米至几百微米,成因较复杂,有晶间孔,晶间溶孔,晶内溶孔,粒间溶孔,裂缝充填残孔,砾内砾间孔等多种类型。(2)溶蚀孔洞(缝洞型)的大小在5~100 mm,且被方解石或砂泥部分充填。(3)裂缝(裂缝型)是最发育、最常见的储集空间之一,油气显示十分活跃,并以构造溶缝为主,张开度达到1~8 mm不等,半充填或未充填。本文实验用的两块试样QI4#、DENG4#均采自四川东北部的碳酸盐岩露头。QI4#试样的表面虽然天然裂缝不发育(图1),但是其表面分布有较多的晶粒、灰色豹斑状溶孔,具有典型的缝洞型碳酸盐岩特征。DENG4#试样的表面天然裂缝较发

育且较宽(图2),同时溶蚀孔洞并不发育,具有典型的裂缝型碳酸盐岩的特征。

针对水力压裂过程中储层的破裂规律与水力裂缝的传播规律,前人已经做了充分地研究。侯冰,谭鹏<sup>[7]</sup>等人进行了致密灰岩储层的真三轴水力压裂实验,研究了水力压裂垂直传播特性,分析了影响页岩压裂效果的地质和工程因素,发现在走滑断层应力状态下容易形成缝,变排量压裂可以激活更多的天然裂缝等。Bing Hou, Zhi Chang<sup>[8]</sup>等人进行了高应力条件下页岩的真三轴实验,采用瓜尔胶与滑溜水交替注液的方法,将瓜尔胶的易封堵特性与滑溜水的易流动特性相结合,有效地提高了页岩储层的裂缝激活率。Zhang Fengshou, Branko Damjanac<sup>[9]</sup>等人创新了一种新的离散元方法模拟了水力裂缝与天然裂缝的沟通,这种方法考虑了裂缝随机分布、应力衰减等因素,并对断层活化过程中的微地震数据进行了分析。Zhiyuan Liu, Mian Chen等<sup>[10]</sup>探究了水力压裂的传播行为,发现影响水力裂缝发生和扩展的主要因素是天然裂缝的方向和水平差异应力。

碳酸盐岩能够与酸液发生酸岩反应,这一特性决定了酸压是该储层有效的改造手段:一方面,酸化压裂技术能够使储层岩石结构破坏,降低岩石的强度,进而改善近井筒的地层孔渗状态,降低地层破裂压力;另一方面,酸液能够酸刻溶蚀裂缝和孔洞,沟通储层天然裂缝系统<sup>[11]</sup>。

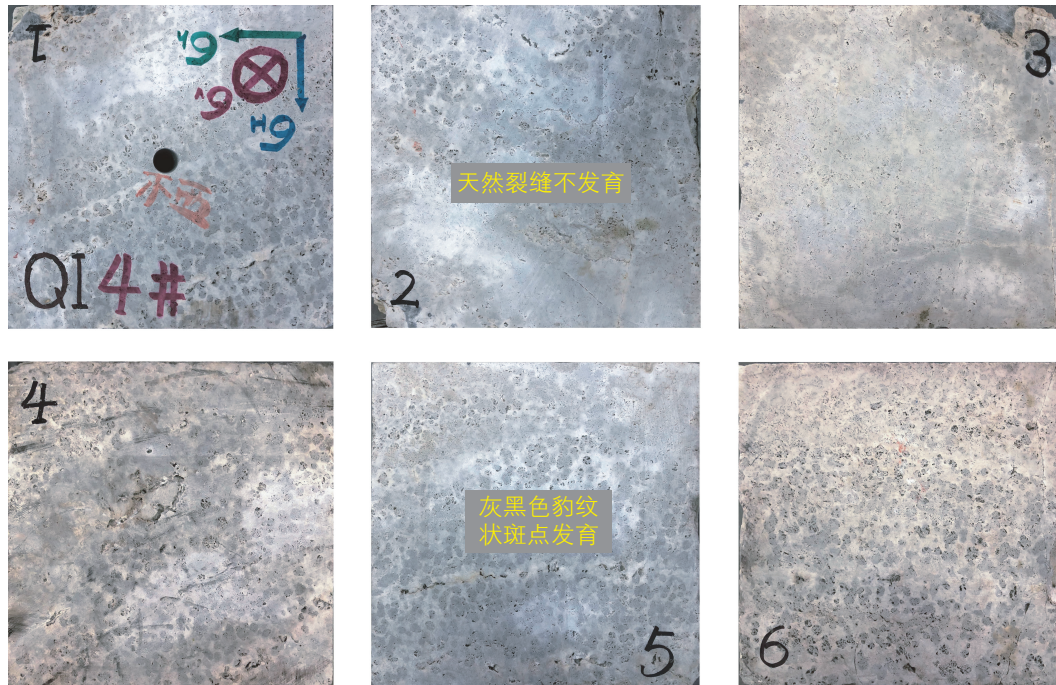


图 1 QI4# 缝洞型碳酸盐岩立方体试样的表面

Fig. 1 Surfaces of QI4# fracture-cavity type carbonate rock sample

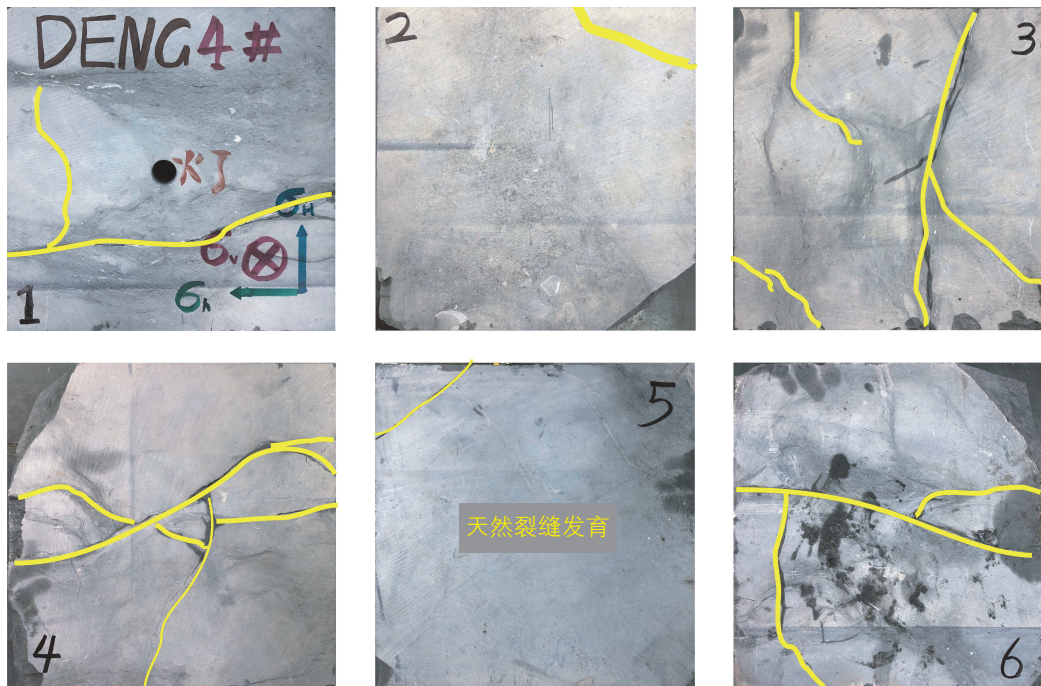


图 2 DENG4# 裂缝型碳酸盐岩立方体试样的表面

Fig. 2 Surfaces of DENG4# fracture type carbonate rock sample

针对碳酸盐岩储层的酸化压裂, M.Azeemuddin, S. G.Ghori<sup>[12]</sup>等人建立了碳酸盐岩储层测井及水力裂缝扩展模型, 发现在高注入速率条件下, 水力裂缝更容易穿过碳酸盐岩储层向上覆致密岩层扩展, 而这会导致压裂液的漏失。Ding Zhu, Oeth, C.V<sup>[13]</sup>等人建立了酸

压裂缝的三维模拟方法, 模拟了酸压裂缝的传播路径以及断面的酸蚀效应。M.S.Aljawad, Ding Zhu<sup>[14]</sup>等人结合酸液渗流模型与断裂力学模型, 建立了碳酸盐岩酸压的数值计算模型, 对酸压后的裂缝走向、裂缝连通率进行了预测。Bing Hou, Ruxin Zhang<sup>[15]</sup>等人对酸

压条件下碳酸盐岩储层中裂缝的萌生与扩展进行了探究,认为断面的酸液刻蚀程度与裂缝传播距离是评估水力压裂效果的重要因素。

目前针对碳酸盐岩的真三轴水力压裂裂缝扩展规律研究已经有不少,而针对不同储集类型的碳酸盐岩的压裂规律较少有人探究。本文将对裂缝型和缝洞型两种碳酸盐岩在真三轴酸压条件下的破裂特征及泵压特征等进行探究。

## 1 酸化压裂物理模拟实验设计

### 1.1 实验设备和试样加工

实验设备采用中国石油大学(北京)岩石力学实验室设计、组建的一套大尺寸真三轴模拟试验系统<sup>[16]</sup>。碳酸盐岩露头试样单轴岩石力学参数如下:抗压强度 179.3 MPa,弹性模量 44.94 MPa,泊松比 0.27,受到微裂隙的影响。试样在常规三轴实验中以剪切缝为主。借助岩石切割机将不规则的露头切割成尺寸为 300 mm 立方体试样,在试样中部钻出直径 30 mm,长度 210 mm 的沉孔,模拟直井眼;清洗井眼后将长度 180 mm 的钢质注液管胶固到井孔中,在注液管下方预留 30 mm 的空间以模拟裸眼完井。为防止酸液对金属设备腐蚀,在设备表面涂有防腐漆,在井口处放置少量小苏打,以防止酸液外渗。

### 1.2 实验方案和步骤

首先将碳酸盐岩试样置于真三轴实验装置中并组装设备,随后进行真三轴应力加载。实验过程中,为模拟直井筒压裂,施加三向应力时,沿着井筒方向施加中间主应力。将红色墨水和荧光示踪剂添加到转向酸液中用于跟踪和观察诱导的裂缝。为了避免三轴应力的不平衡加载,依次将最小水平应力 $\sigma_h$ 、最大水平应力值 $\sigma_H$ 、中间主应力 $\sigma_v$ 加载到设计值。然后将压裂液以 10 mL/min 的泵速沿井筒注入样品中,具体的实验参数如下(表 1)。压裂后,沿诱导裂缝打开每个样品,观察和记录实验结果,随后用小苏打中和实验装

置中剩余的酸性流体,并将实验室废物被送到的回收部门处理。

## 2 实验结果分析

实验结束之后,沿着试样表面的裂缝打开样品,记录下了两块试样在酸压过程中的裂缝起裂及延伸特征,同时对它们的破裂特征及泵压曲线进行了对比分析。

### 2.1 缝洞型碳酸盐岩酸压裂缝形态

QI4# 试样为典型的缝洞型碳酸盐岩,虽然其中天然裂缝不发育,但是溶蚀孔洞、裂缝较多,这使酸压裂缝表现出了多洞沟通、单一裂缝的特征。首先受应力条件的影响,试样沿着最大主应力方向从近井筒的位置起裂,形成一条垂直酸压裂缝(图 3(1)和 3(2))。随后主裂缝延原方向延伸。破裂后 QI4# 试样的断面发现了蚓洞群(图 3(4)),这是由于基质中的原生溶蚀孔洞对次生裂缝产生了诱导的作用,形成了树枝状、多级排列的蚓洞群,蚓洞间相互沟通,随酸液刻蚀作用增加主裂缝表面凹凸程度,提高裂缝面导流能力。

为更好地观察酸液蚀刻的效果,对破裂后的试样进行了 3D 断面扫描(图 3(3))。裂缝表面凹凸不平,酸蚀严重,近井眼附近断面粗糙程度比远离井眼处要深,随着距离的增加,示踪剂颜色逐渐变浅,表明酸液与岩样表面发生了反应,随后酸液逐渐减少,直至流出试样边缘。

### 2.2 裂缝型碳酸盐岩酸压裂缝形态

DENG4# 为裂缝型碳酸盐岩,发育有复杂的天然裂缝,这决定了其破裂时裂缝交叉扩展的特征。裂缝首先在近井筒处起裂,初始裂缝沿着最大主应力的方向扩展,沟通天然裂缝,形成了三个由天然裂缝开启形成的次级断面(图 4(2))。

从 DENG4# 的 3D 断面扫描结果看(图 4(3)),酸液与岩石基质发生酸岩反应,其刻蚀作用造成了破裂面的凹凸不平。水力裂缝从裸眼段起裂,并在周边形成

表 1 真三轴酸压实验参数

Table 1 Test parameters of true triaxial acid hydraulic tests

试样编号	岩样类型	垂向应力/MPa	最大水平主应力/MPa	最小水平主应力/MPa	水平应力差/MPa	酸类型	排量/(mL/min)
QI4#	栖霞组露头(缝洞型)	30	25	5	20	转向酸	10
DENG4#	灯四段露头(裂缝型)	30	25	5	20	转向酸	10

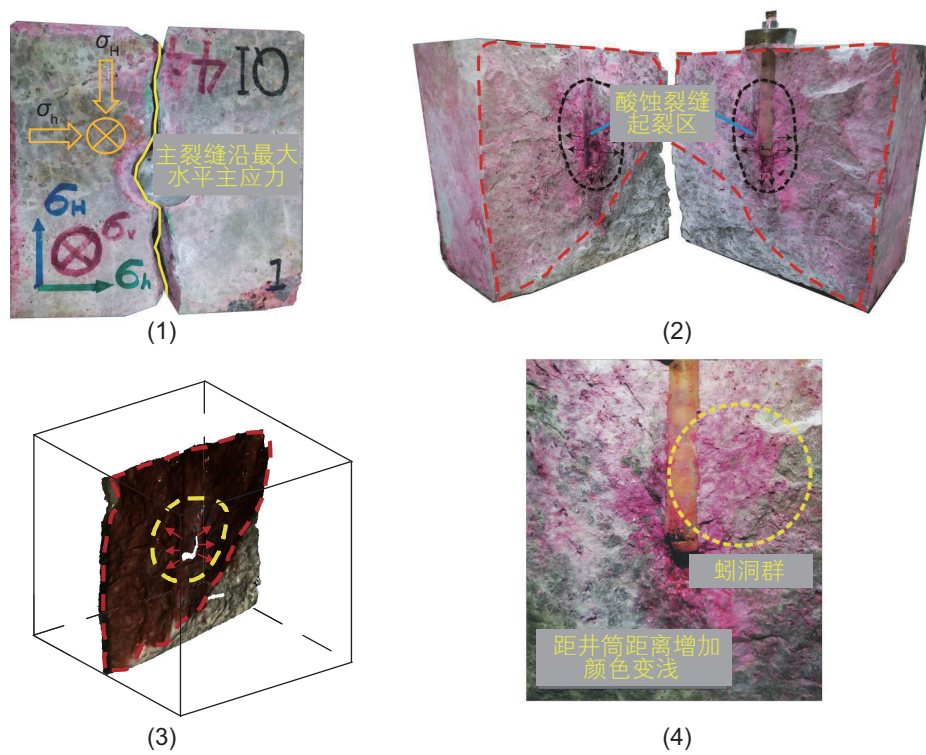


图3 Q14#试样破裂图  
Fig. 3 Diagram of Q14# sample after being fractured

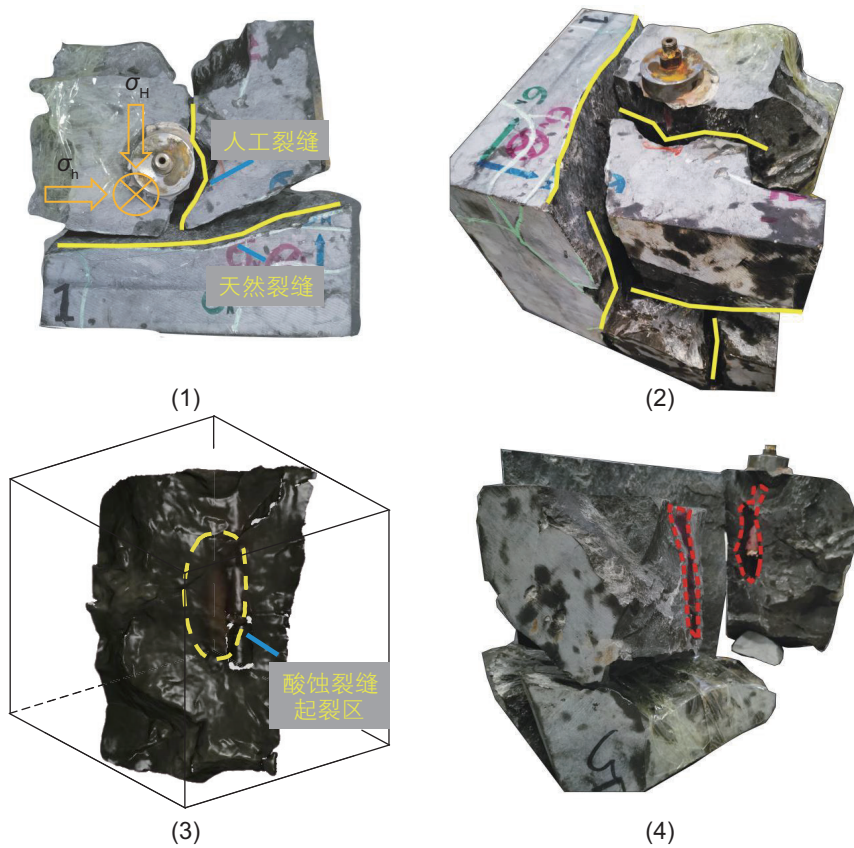


图4 DENG4#试样破裂图  
Fig. 4 Diagram of DENG4# sample after being fractured

酸蚀溶洞，酸液产生漏失，减弱了酸压的效果，从工程角度来说，这种情况应该避免。

### 2.3 两种储层岩石破裂泵压曲线对比

采集了两种试样的注入压力数据，并绘制出泵压曲线。QI4#的泵压曲线为单峰型(图 5)，表明岩体发生过一次显著破裂，压裂前期采取酸化作业，压力上升，随后酸液受压向岩体内渗入，井口压力缓慢降低。泵压曲线第二次上升时，由于岩体中存在灰黑色豹纹状斑点，且矿物晶体相互嵌入，酸流经处豹纹状斑点的溶蚀严重，泵压曲线显示为注入压力小幅度波动。达到破裂压力后，注入压力下降较缓慢，酸液与基质岩石发生了反应。

DENG4#的泵压曲线也为单峰型(图 5)，可见岩体仅发生过一次显著破裂，伴随多次溶蚀破裂。达到破裂压力后注入压力快速下降，酸液在试样压裂后沿着天然裂缝快速流到了试样边缘部位，并未与断面的基岩充分反应，断面部位示踪剂的颜色仅在近井筒周围较深也说明了这一点(图 3)。

DENG4#裂缝型的破裂压力更高(15.3 MPa)，而QI4#缝洞型的较低(7.1 MPa)。这是由于QI4#试样中天然溶蚀孔洞对裂缝的扩展起到了诱导作用，形成树枝状的蚓洞群，降低了裂缝延伸的难度。虽然DENG4#裂缝型试样中远井处天然裂缝更发育，但近井筒起裂部位天然裂缝并不发育(图 6)，裂缝起裂较困难，导致DENG4#试样破裂压力较高。

### 2.4 酸压和酸化对裂缝型碳酸盐岩压裂效果的对比

谭鹏等人 2016 年利用裂缝型碳酸盐岩进行滑溜水

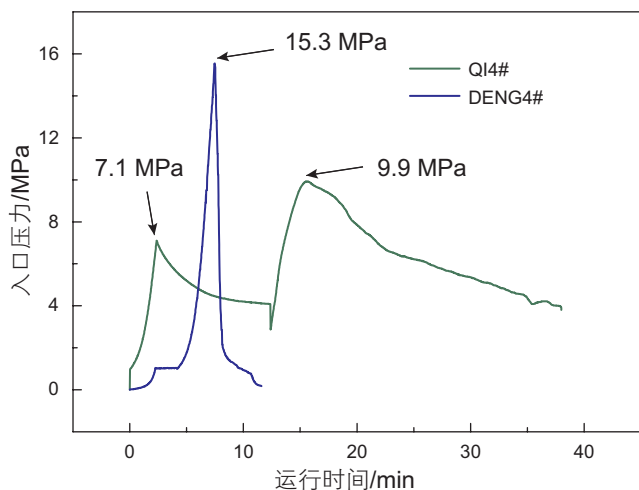


图 5 碳酸盐岩酸压试样泵压曲线  
Fig. 5 Pump pressure curves for carbonate sample QI4# and DENG4#

压裂和泡酸后压裂(泡酸指在裸眼段用 47% 的盐酸浸泡 0.5 h)<sup>[7]</sup>，由于实验参数近似，将其与本次裂缝型碳酸盐岩 DENG4# 酸液压裂效果进行对比。由图 7，滑溜水压裂时破裂压力最高，酸化处理其次，酸液压裂最小。可见对碳酸盐岩而言，酸液压裂降低破裂压力效果最明显，且优于泡酸处理，滑溜水压裂破裂压力最高。裂缝延伸阶段酸压试样的曲线波动相对另外两种最小，表明酸液与基岩的反应减少了水力裂缝扩展的阻碍。

碳酸盐岩中的碳酸盐会与酸液反应，侵蚀裸眼段壁面，降低壁面强度，用滑溜水压裂可降低破裂压力。而未经泡酸处理，采用酸液压裂，酸液主要在裂缝起裂及扩展的过程与碳酸盐岩发生作用，这种弱化作用相对泡酸处理更明显。

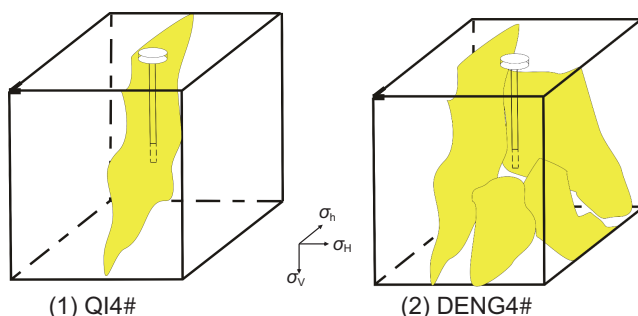


图 6 碳酸盐岩酸压试样裂缝面分布示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of crack surface distribution after the carbonate samples were fractured

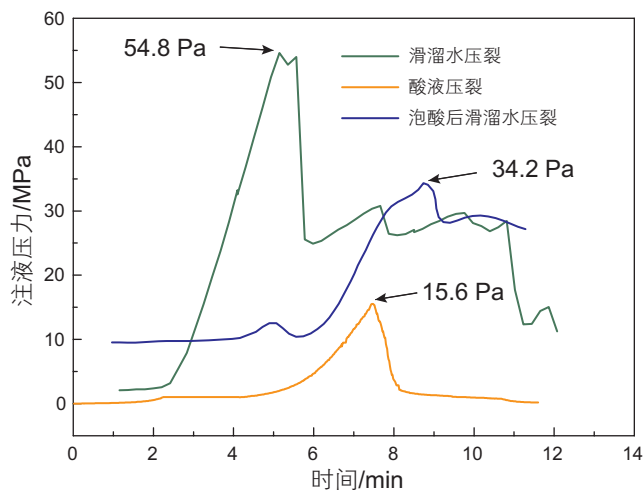


图 7 裂缝型碳酸盐岩在滑溜水压裂、酸液压裂、泡酸后滑溜水压裂条件下的泵压曲线  
Fig. 7 Pump-pressure curves under the conditions of slick water fracturing, acid fluid fracturing and slick water fracturing after dipped by acid

### 3 结论与认识

本文针对缝洞型及裂缝型碳酸盐岩试样进行了酸压条件下的真三轴物理模拟实验,对两种碳酸盐岩酸压后的破裂特征及泵压曲线进行了分析对比,得到以下结论:

(1)无论是缝洞型还是裂缝型碳酸盐岩,基质中天然弱结构(缝或洞)都对压裂产生的人工裂缝的延伸起到了积极的诱导作用。天然弱结构的差异导致了二者压裂效果不同:缝洞型碳酸盐岩更倾向于形成单一裂缝,裂缝型碳酸盐岩试样更易形成较复杂的交叉型裂缝网络。在缝洞型碳酸盐岩中,基质中的原生溶蚀孔洞对次生裂缝产生了诱导的作用,形成了树枝状、多级排列的蚓洞群,蚓洞间相互沟通。在裂缝型碳酸盐岩中,人工裂缝主要沿着基质中原有的天然裂缝延伸,形成了较复杂的缝网结构。

(2)与裂缝型碳酸盐岩相比,缝洞型碳酸盐岩具有

更低的破裂压力,这并不代表缝洞型碳酸盐岩的压裂效果更好,因为裂缝型碳酸盐岩天然裂缝发育,压裂后更易形成交叉、复杂的缝网结构,更有利于油气渗移,进而提高采集率。

(3)酸液蚀刻方面,裂缝型碳酸盐岩中酸液与基质作用的区域主要集中在井眼区域,蚀刻效果不明显。而在缝洞型碳酸盐岩中,酸液与基质的作用区域更大,断面蚀刻程度更深,弱化效果更好。

(4)裂缝型碳酸盐岩采用滑溜水压裂时破裂压力最高,酸化处理其次,酸液压裂最小。对碳酸盐岩而言,酸液压裂降低破裂压力效果最明显,且优于泡酸处理,滑溜水压裂破裂压力最高。

针对不同储集类型碳酸盐岩的压裂,即使在相同的施工参数、相同的地应力条件下,仍然会获得不同的压裂效果,所以在酸压过程中应该对不同类型的碳酸盐岩进行区别对待,采取不同的工程措施,以分别提高产量。

### 参考文献

- [1] 罗平,张静,刘伟.中国海相碳酸盐岩油气储层基本特征[J].地学前缘,2008,15(1):36-50.[LOU P,ZHANG J,LIU W.Characteristics of marine carbonate hydrocarbon reservoirs in China[J].Earth Science Frontiers,2008,15(1):36-50.]
- [2] 雍自权,罗志立,刘树根,等.四川盆地海相碳酸盐岩储集层与构造运动的关系[J].新疆石油地质,2009(4):459-462.[YONG Z L,LUO Z L,LIU S G,et al.The relationship between marine carbonate reservoir and tectonics in Sichuan Basin[J].Xinjiang Petroleum Geology 2009(4):459-462]
- [3] 陈学时,易万霞,卢文忠.中国油气田古岩溶与油气储层[J].沉积学报,2004,22(2):13-25.[CHEN X S,YI W X,LU W Z.The paleokarst reservoirs of oil/gas fields in China[J].Acta Sedimentologica Sinica.2004,22(2):13-25]
- [4] 林忠民.塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层特征及成藏条件[J].石油学报,2002,23(3).[LIN Z M.Carbonate rock reservoir features and oil-gas accumulating conditions in the ordovician of Tahe oilfield in northern Tarim Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2002,23(3)]
- [5] MOTYKA J.A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks,illustrated by examples from Poland[J].Hydrogeology Journal,1998,6(4):469-482.
- [6] 张希明.新疆塔河油田下奥陶统碳酸盐岩缝洞型油气藏特征[J].石油勘探与开发,2001,28(5):17-22.[ZHANG X M.The characteristics of Lower Ordovician fissure-vug carbonate oil and gas pools in Tahe oil field,Xinjian[J].Petroleum Exploration and Development,2001,28(5):17-22.]
- [7] 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 B,TAN P,CHEN M,et al.Experimental investigation on propagation geometry of hydraulic fracture in compact limestone reservoirs]
- [8] HOU B,CHANG Z,W FU,et al.Fracture Initiation and Propagation in a Deep Shale Gas Reservoir Subject to an Alternating-Fluid-Injection Hydraulic-Fracturing Treatment.Society of Petroleum Engineers.2019.doi:10.2118/195571-PA
- [9] ZHANG F,DAMJANAC B,MAXWELL S,et al.Investigating hydraulic fracturing complexity in naturally fractured rock masses using fully coupled multiscale numerical modeling[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2019.
- [10] LIU Z,CHEN M,ZHANG G,et al.Analysis of the influence of a natural fracture network on hydraulic fracture propagation in carbonate formations[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,2014,47(2):575-587
- [11] 朱光有,张水昌,梁英波,等.TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造——四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J].岩石学报,22(8).[ZHU Y G,ZHANG S C,LIANG Y B,et al.Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR:An important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan basin.Acta Petrologica Sinica,22(8)]
- [12] AZEEMUDDIN M,GHORI S G,SANER S,et al.Injection-induced hydraulic fracturing in a naturally fractured carbonate reservoir:A case study from Saudi Arabia[C]//International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control.Society of Petroleum

- Engineers, 2002.
- [13] ZHU D, OETH C V, HILL A D. Acid fracturing: Fully 3D simulation and performance prediction[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Society of Petroleum Engineers, 2013.
- [14] ALJAWAD M S, ZHU D, HILL A D. Temperature and geometry effects on the fracture surfaces dissolution patterns in acid fracturing[C]//SPE Europec featured at 80th EAGE Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [15] HOU B, ZHANG R, ZENG Y, et al. Analysis of hydraulic fracture initiation and propagation in deep shale formation with high horizontal stress difference[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 170: 231–243.
- [16] 陈勉, 庞飞, 金衍. 大尺寸真三轴水力压裂模拟与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 868–872. [CHEN M, PENG F, JIN Y. Experiments and analysis on hydraulic fracturing by a large-size triaxial simulator[J]. Chinese Journal of Mechanics and Engineering, 2000, 19(S1): 868–872]

(责任编辑 李世远 编辑 马桂霞)