

# 须家河组致密砂岩水力压裂裂缝形态的试验研究

魏元龙<sup>1</sup>, 杨春和<sup>1,2</sup>, 郭印同<sup>2</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 侯振坤<sup>1</sup>, 徐峰<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**为研究建南地区须家河组致密砂岩储层水力压裂裂缝延伸特征及空间展布规律,利用室内真三轴水力压裂物理模拟系统,开展致密砂岩水力压裂试验研究。基于试验结果,初步揭示水力裂缝的起裂与扩展机制,分析水力裂缝的裂缝形态,讨论压裂液排量、类型及地应力差异系数对水力裂缝的影响。研究表明:致密砂岩水压致裂后主要形成单一、单翼的水力裂缝,较少形成交叉网络裂缝。水力裂缝主要有 4 种起裂模式和 6 种扩展模式,岩石性质是控制起裂与扩展模式的主要因素之一。泵压曲线可分为 4 大类,第 1 类泵压曲线对应于单一、单翼的平面型裂缝,第 2~4 类曲线对应于交叉网络裂缝。破裂压力与排量呈正相关的关系,而与地应力差异系数没有明显规律。压裂液为蒸馏水时,必须考虑滤失效应,而压裂液为液压油时,则不考虑。

**关键词:**岩石力学;须家河组;致密砂岩;水力压裂;裂缝形态;真三轴物理模拟;泵压曲线

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2016)增 1-2720-12

## Experimental study on hydraulic fracture geometry of tight sandstone from Xujiahe group

WEI Yuanlong<sup>1</sup>, YANG Chunhe<sup>1,2</sup>, GUO Yintong<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, HOU Zhenkun<sup>1</sup>, XU Feng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** To investigate the propagation characteristics and spatial distributions of hydraulic fractures of tight sandstone, the large real triaxial physical model experiment system has been selected to conduct hydraulic fracture tests on the outcrop tight sandstone samples drilled from Xujiahe Group, Jiannan Area. Based on the tests results, the mechanism of crack extension and initiation is exposed and bedding plane with the fracture morphologies has been analyzed. Also, the effects of types and delivery capacity of fracture fluid and differential parameters of in-situ stress on the fracture morphology have been discussed. The results indicate that hydraulic fractures of tight sandstone are easy to extend along one direction and present single-wing style, so they are less likely to form crossover crack network. As to tight sandstone, the rock properties play important roles in controlling initiation and extension mode of fractures. In summary, there are four kinds of hydraulic fracture initiation modes and six kinds of extension mode. And, pumping pressure-time curves can be divided into four types: the 1th curve type is corresponding to single-wing, planar crack; the others are belonged to network crack. The fracture pressure has a linear relation with delivery capacity, and it is irrelevant to differential parameters of in-situ stress. It's worth

**收稿日期:** 2015-02-02; **修回日期:** 2015-09-14

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划("863"计划)(2013AA064800); 国家自然科学基金资助项目(51574218)

Supported by the National High Technology Research and Development Program(Grant No. 2013AA064800) and National Natural Science Foundation of China(Grant No. 51574218)

**作者简介:** 魏元龙(1988-), 男, 2011年毕业于重庆大学资环学院采矿工程, 现为博士研究生, 主要从事致密砂岩、页岩水力压裂中的岩石力学等方面的研究工作。E-mail: at6wyl@163.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2015.0114

mentioning that leak-off effect should not be considered unless distilled water is employed as fracture fluid.

**Key words :** rock mechanics ; Xujiahe Group ; tight sandstone ; hydraulic fracture ; fracture geometry ; triaxial physical simulation ; Pumping pressure curve

## 1 引 言

我国致密气分布广泛、资源潜力巨大,资源量约为  $1.2 \times 10^{13} \text{ m}^3$ ,广泛分布于鄂尔多斯、四川、松辽、渤海湾、柴达木、塔里木及准噶尔等 10 余个盆地,其中鄂尔多斯和四川盆地最为丰富。四川盆地致密气勘探开发潜力巨大,仅川西侏罗系与上三叠统的致密气资源量为  $1.8 \times 10^{12} \sim 2.51 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,探明储量约为  $2.2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。而上三叠统须家河组致密砂岩储层又是四川盆地川中地区致密气的重点勘探和开发地层<sup>[1]</sup>。

致密砂岩气藏具有天然裂缝发育,孔隙度在 3%~15%,覆压基质渗透率小于 0.1 mD,单井无自然产能或自然产能低于工业气流下限,须经过大型水力压裂、水平井、多分支井等技术改造才能产出工业气流等特点。建南地区须家河组致密砂岩储层的埋藏深度较深,储层结构和地应力比较复杂,并且缺乏准确、有效的现场检测手段,无法直接观测地下储层的水力压裂改造效果。通过对须家河组致密砂岩进行真三轴水力压裂物理模拟试验,初步探明和掌握致密砂岩水力压裂的破裂特征和水力裂缝延伸规律,对水力压裂设计、储层改造和提高采收率等至关重要。

目前,国内外学者对岩石的水压致裂进行了一系列研究。其中,A. A. Daneshy 等<sup>[2-3]</sup>指出岩石性质是控制水力裂缝在层状地层中延伸的主要因素。L. A. Behrmann 和 J. L. Elbel<sup>[4]</sup>认为水力裂缝或沿射孔根部起裂,或沿井轴与最小主应力平行的井壁的切面起裂,并且水力裂缝起裂与注入速度、射孔方位密切相关。H. Hazim 和 D. L. Meadows<sup>[5]</sup>得到了定向射孔的方位应为地层中易产生水力裂缝的方向,此时,可在储层中形成一条宽的平面裂缝,而不会产生多条平行裂缝、重新定向裂缝和 T 形裂缝的结论。陈青<sup>[6]</sup>提出了破裂压力评价公式,并对川西地区部分须家河组致密砂岩单井进行了破裂压力验证和评价。张矿生等<sup>[7]</sup>观察到致密砂岩压裂后容易形成单一主裂缝,而页岩容易形成复杂裂缝。衡帅等<sup>[8]</sup>得到了当水力裂缝垂直层理扩展时,在弱层理面处会发生分叉、转向,延伸过程中将进一步沟通天然

裂缝或弱层理面形成裂缝网络的试验结果。李芷等<sup>[9]</sup>认为当垂向主应力与水平最大主应力相差极小时,页岩各个方向的起裂压力相差极小,水力裂缝向最大水平主应力方向偏转延伸。

本文采用室内真三轴水力压裂物理模拟试验系统对须家河组致密砂岩展开了水力压裂试验,分析了水力裂缝的起裂与延伸机制,讨论了层理面、排量、地应力差异系数和压裂液类型对水力裂缝的影响。期望试验结果能够对须家河组致密砂岩气藏的水力压裂设计和储层改造提供一定的技术支持。

## 2 试验条件及方法

### 2.1 试样采集与制备

试样取自湖北利川谋道镇须家河组须六段致密砂岩露头。岩性以厚层块状浅灰色、灰色细砂岩和中砂岩为主,天然密度为  $2.47 \text{ g/cm}^3$ 。首先,将不规则岩块加工为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的立方体标准试样。其次,利用外径 24 mm 金刚石钻头在试样中心钻取深度为 170 mm 的圆孔模拟水平井筒。采用长度 140 mm,外径 20 mm,内径 15 mm 的高强度钢管模拟裸眼井套管,如图 1 所示;再次,采用自制射孔钻机在试样的井筒内完成射孔;射孔位置分别为井筒深度 150 和 160 mm,射孔方向分别垂直试样上、下表面,在井筒上总共完成 4 个射孔,射孔深度 7~12 mm。最后,利用食盐充填裸眼段(长度 30 mm)后,采用高强度黏结剂将套管与预制井筒封固。封孔试样的井筒示意图如图 2 所示。试验前清理井筒裸眼段的食盐,然后对井筒内施加 0.5 MPa 的水压检测已封孔试样是否漏水。

### 2.2 试验设备

利用中国科学院武汉岩土力学研究所的室内真三轴水力压裂物理模拟试验系统(见图 3)进行须六段致密砂岩的水力压裂物理模拟试验。该系统由真三轴物理模型试验机和水利压裂伺服泵压系统组成,其中真三轴物理模型试验机模拟施加三向主应力,水利压裂伺服泵压系统控制压裂液排量。在压裂液中添加红色示踪剂,用于试验后观察试样表面的水力裂缝和内部的水力运移通道。

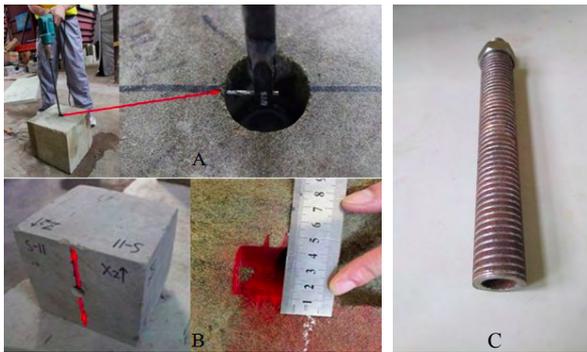


图1 射孔方位与深度

Fig.1 Perforation direction and depth

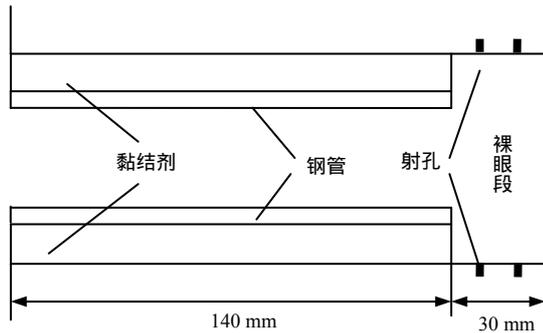


图2 井筒示意图

Fig.2 Explanatory view of well



图3 真三轴水力压裂物理模拟试验系统

Fig.3 Physical simulation system of real triaxial hydraulic fracture experiment

### 2.3 试验方案

致密砂岩水力压裂物理模拟试验主要考虑排量、地应力差异系数和压裂液类型对水力裂缝起裂与延伸的影响。试验参数选取如下：(1) 依据江汉油田现场地应力资料，将地应力差异系数 $\beta$ 分别取为 0.05, 0.15 和 0.25。三向主应力的加载方式如图 4 所示，三向主应力的大小如表 1 所示。(2) 为达到提高裂缝内净压力实现裂缝转向的目的，将排量分别取为 1, 2 和 4 mL/s。(3) 压裂液类型不同，岩石的滤失效应不同，因此选择 2 种黏度不同的压裂液：蒸馏水和液压油。各试样的具体试验方案和参数如表 1 所示。

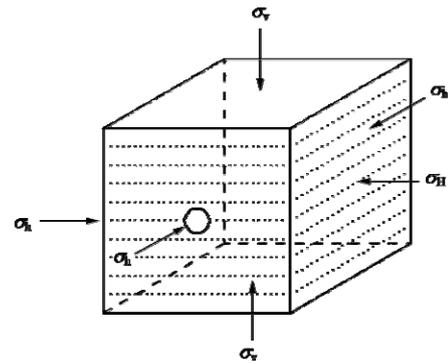


图4 水平井真三轴水力压裂加载方式示意图

Fig.4 Three principal stresses loading model of the hydraulic fracture in horizontal well

表1 水力压裂物理模拟试验方案

Table 1 Schemes of hydraulic fracture physical simulation experiment

试样编号	地应力差异系数 $\beta$	$\sigma_v$ /MPa	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_r$ /MPa	排量/mL
S-18, 24°	0.05	13.03	13.12	12.46	1
S-13	0.05	13.03	13.12	12.46	2
S-3	0.05	13.03	13.12	12.46	4
S-16, 20	0.15	13.03	13.12	11.15	1
S-14, 15, 22°	0.15	13.03	13.12	11.15	2
S-11, 17	0.15	13.03	13.12	11.15	4
S-7, 21	0.25	13.03	13.12	9.84	1
S-8, 12, 19	0.25	13.03	13.12	9.84	2
S-9, 23°	0.25	13.03	13.12	9.84	4

注：其中带“\*”试样的压裂液为液压油，剩余试样的压裂液为蒸馏水。

### 3 水力裂缝起裂特征分析

水平井井筒的应力场分布受到原岩地应力、井筒内液体压力和压裂液滤失效应的影响。沿井筒轴线将三维模型受力图简化为平面图，如图 5 所示。

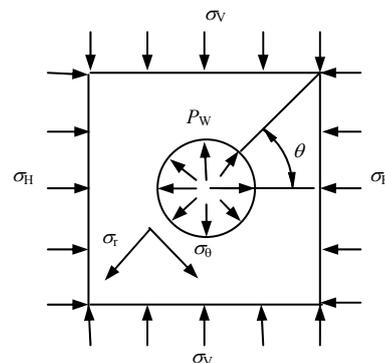


图5 井壁围岩受力模式简图

Fig.5 Simple diagram of stress model of well wall rock

取压应力为正，拉应力为负。将岩石视为均质、各向同性的小变形弹性体，利用线性叠加原理得到水平井井壁围岩应力场公式<sup>[10]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2} \right) \\ \cos(2\theta) + \frac{R^2}{r^2} P_W + \delta \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right) - \phi \right] (P_W - P_p) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_H + \sigma_V}{2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left( 1 + \frac{3R^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) - \\ &\frac{R^2}{r^2} P_W + \delta \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right) - \phi \right] (P_W - P_p) \\ \sigma_z &= \sigma_h - 2\nu(\sigma_H - \sigma_V) \frac{R^2}{r^2} \cos(2\theta) + \\ &\delta \left[ \frac{\alpha(1-2\nu)}{(1-\nu)} - \phi \right] (P_W - P_p) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_H - \sigma_V}{2} \left( 1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2} \right) \sin(2\theta) \\ \tau_{rz} &= 0, \tau_{z\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\sigma_r$  为井筒径向应力； $\sigma_\theta$  为井筒环向应力； $\sigma_z$  为井筒轴向应力； $\sigma_H$  为水平最大地应力； $\sigma_h$  为水平最小地应力； $\sigma_V$  为垂向主应力； $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{rz}$ 、 $\tau_{z\theta}$  为剪应力； $R$  为井筒半径； $r$  为极坐标半径； $\nu$  为泊松比； $P_W$  为井筒内压； $\alpha = 1 - C_r/C_b$ ， $C_r$  为岩石骨架压缩系数， $C_b$  为岩石体积压缩系数； $\phi$  为孔隙度； $P_p$  为孔隙压力； $\delta$  为系数，考虑滤失效应时  $\delta = 1$ ，否则  $\delta = 0$ 。

令  $M = \alpha(1-2\nu)/(1-\nu) - \phi$ ，当  $r=R$  时，水平井井筒裸眼段井壁的应力分布为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= P_W - \delta\phi(P_W - P_p) \\ \sigma_\theta &= (\sigma_H + \sigma_V) - 2(\sigma_H - \sigma_V) \cos 2\theta - P_W + \\ &\delta M(P_W - P_p) \\ \sigma_z &= \sigma_h - 2\nu(\sigma_H - \sigma_V) \cos(2\theta) + \delta M(P_W - P_p) \\ \tau_{r\theta} &= 0, \tau_{rz} = 0, \tau_{z\theta} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

采用岩石的拉伸强度准则作为井壁围岩的破裂判据。随井筒内压  $P_W$  逐渐增大，环向应力  $\sigma_\theta$  将由压应力逐渐转化为拉应力。当裸眼段为完整围岩，内部层理微裂隙、软弱面和天然裂隙不发育，并且环向应力  $\sigma_\theta$  大于完整岩石的抗拉强度  $\sigma_T$  时，水力裂缝贯穿层理面发生破裂：

$$\sigma_\theta = \sigma_T \quad (3)$$

当水力裂缝在  $\theta = 0^\circ$  或  $\theta = 180^\circ$  处产生起裂时，试样形成垂直垂向主应力  $\sigma_V$  的裂缝面，其临界破裂压力  $P_{VF}$  为

$$P_{VF} = \frac{3\sigma_V - \sigma_H - \sigma_T - \delta MP_p}{1 - \delta M} \quad (4)$$

当水力裂缝在  $\theta = 90^\circ$  或  $\theta = 270^\circ$  处产生起裂时，试样形成垂直水平最大主应力  $\sigma_V$  的裂缝面，其临界破裂压力  $P_{HF}$  为

$$P_{HF} = \frac{3\sigma_H - \sigma_V - \sigma_T - \delta MP_p}{1 - \delta M} \quad (5)$$

当水力裂缝在裸眼段垂直井筒轴线发生破裂时，将形成垂直水平最小主应力  $\sigma_h$  的裂缝面，其临界破裂压力  $P_{hF}$  为

$$P_{hF} = \frac{\sigma_h - 2\nu(\sigma_H - \sigma_V) - \sigma_{CT} - \delta MP_p}{-\delta M} \quad (6)$$

上述理论的适用范围：(1) 岩石为完整、均质、各向同性的多孔弹性介质，内部不包含弱面和天然裂隙，并且微裂隙不能影响线弹性状态。(2) 模拟井筒尺寸远小于立方体试样尺寸。(3) 井壁围岩的破裂准则为：当环向应力  $\sigma_\theta$  达到岩石抗拉强度  $\sigma_T$  时，围岩发生拉伸破裂。(4) 式(4)~(6)仅适用于沿完整围岩发生破裂的试样，不适用与沿层理微裂隙、软弱面和天然裂隙发生破裂的试样。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 泵压曲线分析

图 6 为试样 S-20 的泵压-时间及注入流量-时间曲线。由图 6 可知，向井筒内以排量 1 mL/s 注入压裂液时，泵压曲线初期将缓慢增加，然后近似

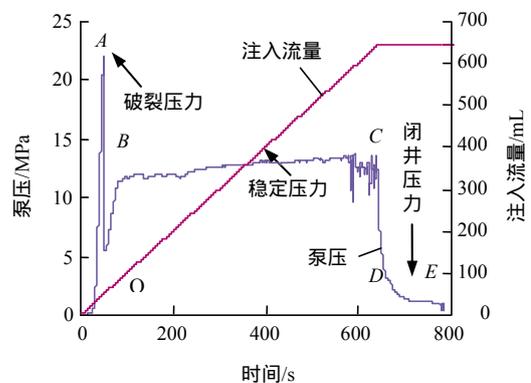


图 6 泵压-时间及时间-注入流量曲线

Fig.6 Curves of pump pressure vs. time and injecting water flow vs. time

直线快速增大(如 *OA* 段)。在 48 s 时井筒裸眼段泵压达到围岩的破裂压力 22.02 MPa, 井壁围岩产生破裂, 泵压曲线突然跌落, 跌落后的泵压低于稳定压力。继续向井筒内注入压裂液, 泵压将逐渐增大至稳定压力 13.06 MPa(如 *AB* 段), 在此过程中, 水力裂缝将在低于稳定压力的水力压力的驱使下向试样表面扩展。当水力裂缝贯通试样表面形成稳定运移通道时, 井筒的注入流量将与试样表面水力裂缝的排出流量基本相等, 稳定压力将基本保持不变, 此阶段泵压曲线呈现为一条近水平的直线(如 *BC*

段)。停止向井筒内注入压裂液, 曲线将突然跌落, 然后缓慢降低至闭井压力(如 *CDE* 段)。

### 4.2 水力裂缝延伸机制及裂缝形态分析

#### 4.2.1 水力裂缝形态分析

图 7 为致密砂岩的破裂特征示意图。图中点线表示层理面, 黑色阴影表示水力裂缝的主裂缝, 倾斜条纹表示软弱面或天然裂隙。根据三向主应力与水力裂缝面的垂直关系, 可将图 7 的水力裂缝示意图主要划分为 4 大类, 典型裂缝形态的具体分类, 如图 8 所示。

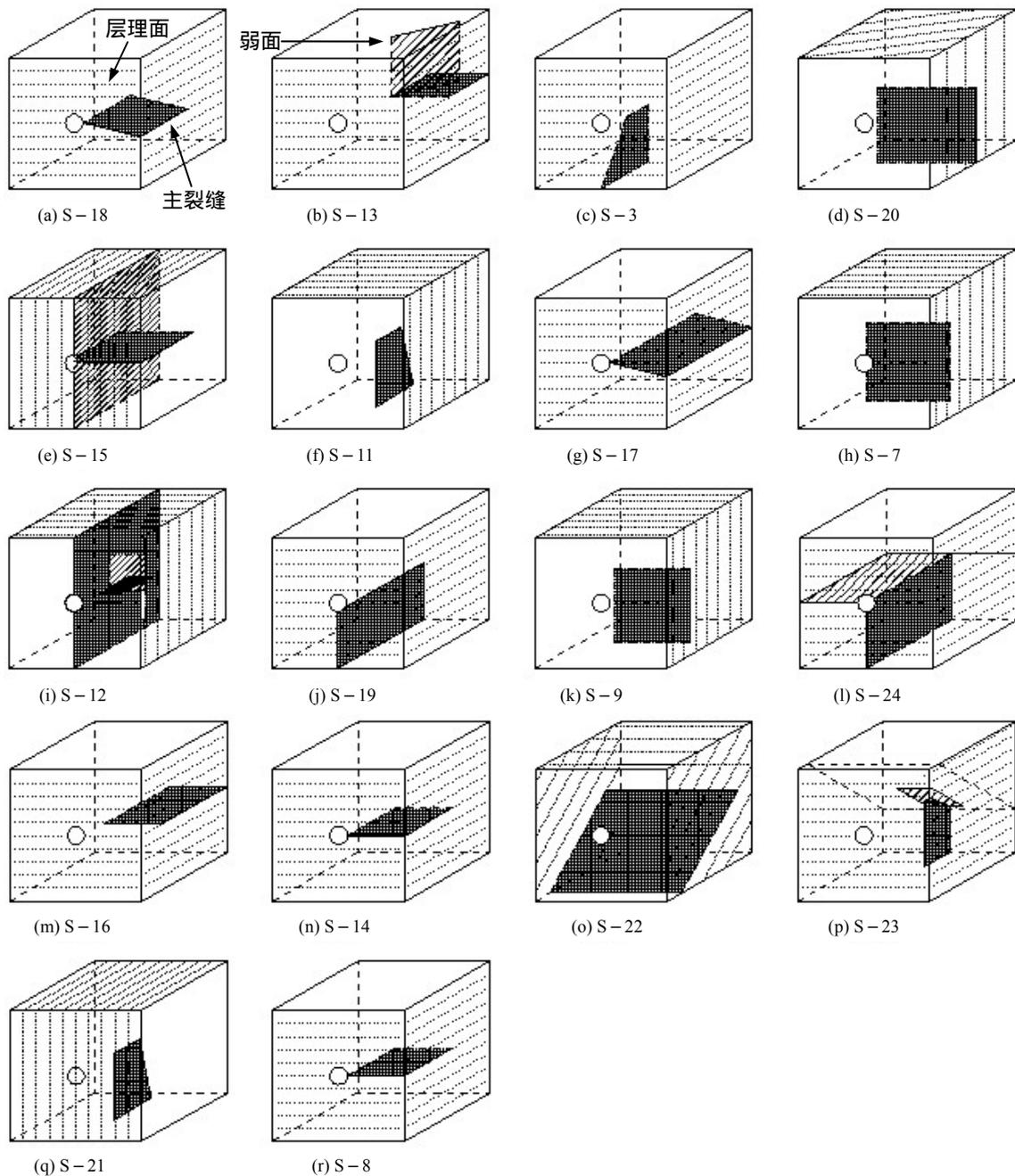


图 7 致密砂岩破裂特征示意图

Fig.7 Schematic diagram of the fracture morphologies of tight sandstone

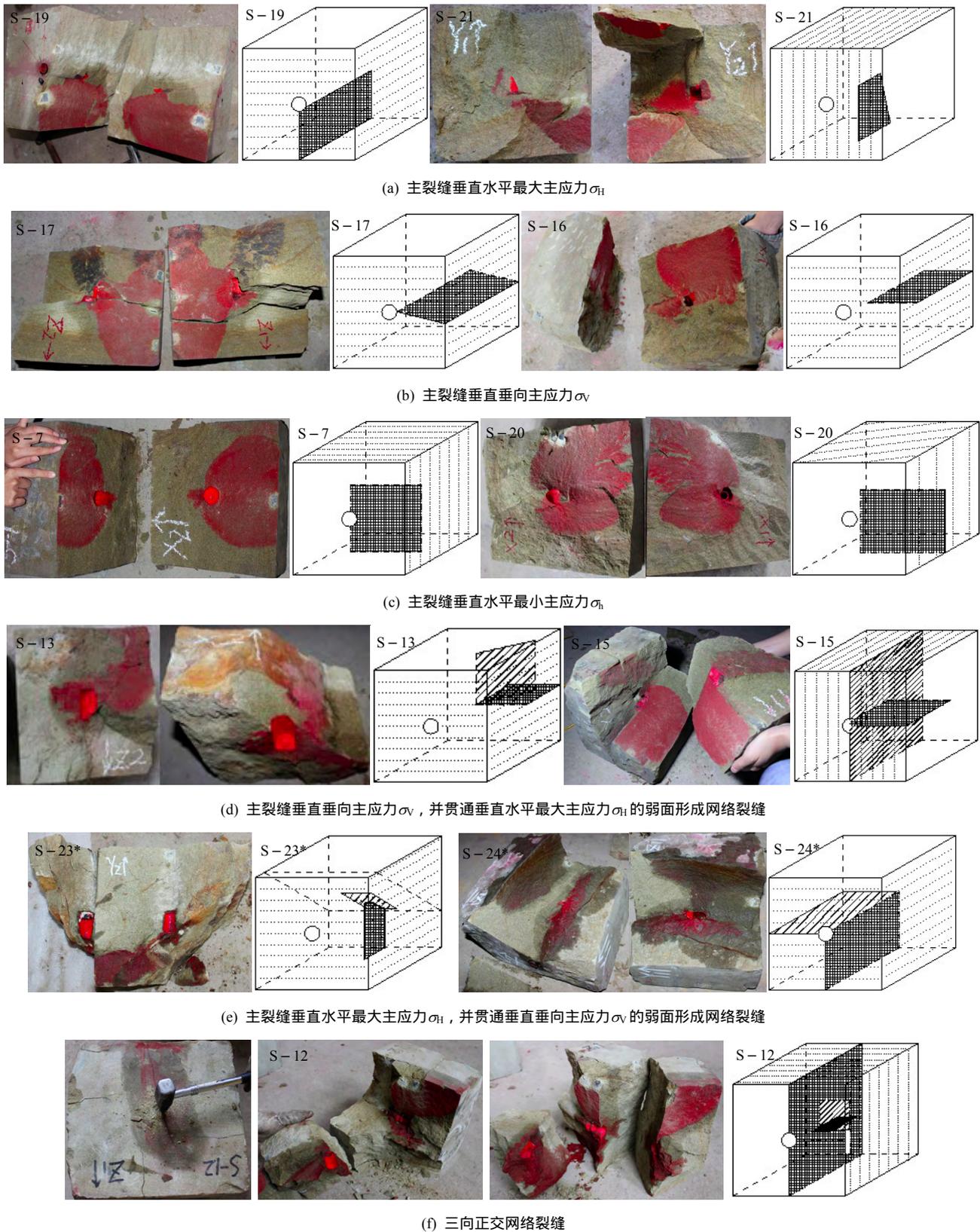


图 8 致密砂岩水力压裂裂缝形态图

Fig.8 Hydraulic fracture morphologies of tight sandstone

由图 8 可知，致密砂岩水力裂缝的裂缝形态主要分为四大类：

(1) 水力裂缝垂直水平最大主应力 $\sigma_{H_0}$ 。由图 8(a)

可知，水力裂缝在井筒裸眼段 $\theta = 90^\circ$ 或 $\theta = 270^\circ$ 处产生起裂，形成主裂缝面与井筒轴线平行，并与水平最大主应力 $\sigma_{H_1}$ 垂直的单一、单翼的水力裂缝。试

样剖开前，可在下表面观察到沿井筒轴线方向的细微水力裂纹。试样剖开后，可观察到仅 1/4 ~ 1/2 的剖面被压裂液染色，被染色区域是水力裂缝的主要运移通道。

(2) 水力裂缝垂直垂向主应力  $\sigma_v$ 。由图 8(b)可知，水力裂缝在井筒裸眼段  $\theta = 0^\circ$  或  $\theta = 180^\circ$  处产生起裂，形成主裂缝面与井筒轴线平行，并与垂向主应力  $\sigma_v$  垂直的单一、单翼的水平裂缝。试样剖开前，可在右表面或者左表面观察到沿井筒轴线方向的细微水力裂纹。试样剖开后，可观察到仅 1/4 ~ 1/2 的剖面被压裂液染色。水力裂缝沿层理面起裂形成平面型主裂缝，否则形成弧型主裂缝。

(3) 水力裂缝垂直水平最小主应力  $\sigma_h$ 。由图 8(c)可知，水力裂缝在井筒底端垂直井筒轴线产生起裂，形成主裂缝面垂直井筒轴线和水平最小主应力  $\sigma_h$  的单一、单翼的垂向裂缝。试样剖开前，可在下表面观察到垂直井筒轴线方向的细微水力裂纹。试样剖开后，可观察到仅 1/4 ~ 1/2 的剖面被压裂液染色。水力裂缝沿层理面起裂形成平面型主裂缝，否则形成弧型主裂缝。

(4) 交叉网络裂缝。交叉网络裂缝主要分为 2 类：主裂缝贯通软弱面形成的交叉网络裂缝和 3 条相互垂直裂缝形成的正交网络裂缝。由图 8(d), (e)可知，水力压裂后，试样形成水平或垂向主裂缝贯通软弱面的交叉网络裂缝。以试样 S-15 为例说明此类交叉网络裂缝的扩展过程：主裂缝向试样左、右表面两翼扩展，右翼裂缝尖端未能贯通试样右表面，而左翼裂缝尖端贯通软弱面后停止向试样左表面扩展。随缝内压力继续增大，左翼裂缝尖端逐渐沿软弱面发生破裂和转向(见图 9)，并最终沿软弱面贯通试样上、下表面形成复杂的交叉网络裂缝。

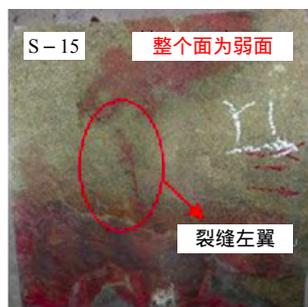


图 9 主裂缝尖端贯通软弱面

Fig.9 Main crack tip penetrating weak structural plan

由图 8(f)可知，水力压裂后，主裂缝两翼被染色的面积均较大，并贯通试样上、下表面；而 2 条次要裂缝被染色的面积均较小，为内部不可见裂缝。

试样最终形成以一条垂直水平最大主应力的双翼主裂缝为主，2 条分别垂直垂向应力和水平最小主应力的次要裂缝为辅，并且 3 条裂缝相互垂直的正交网络裂缝。

4.2.2 网络裂缝形成机制初探

分析致密砂岩水力裂缝的起裂特征和裂缝形态，得到了水力裂缝的 6 种起裂与扩展模式(见图 10)，并分析了致密砂岩网络裂缝的形成机制。

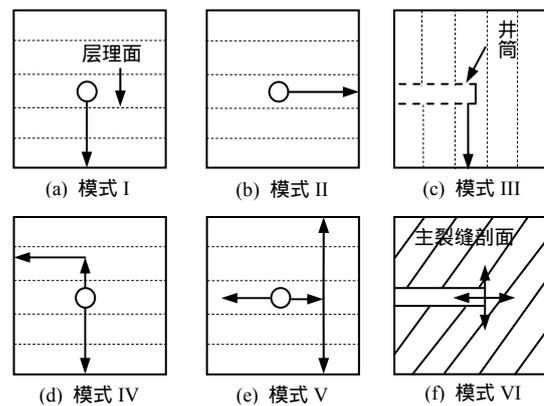


图 10 致密砂岩水力裂缝起裂与扩展模式

Fig.10 The modes of hydraulic fracture initiation and extension of tight sandstone

由图 10 可知，致密砂岩水力裂缝的 6 种起裂与扩展模式如下：

(1) 模式 I。水力裂缝或沿井壁与垂向主应力的切面产生起裂，或沿射孔根部产生起裂，之后均沿井筒轴线垂向延伸，形成垂直水平最大主应力的单一、单翼的垂向主裂缝。此破裂模式产生的条件为：试样完整性良好，层理面胶结程度较强，且裸眼段的层理微裂隙不发育。

(2) 模式 II。水力裂缝或沿层理微裂隙起裂，或沿层理面张开的天然裂隙起裂，之后均沿井筒轴线水平延伸，形成垂直垂向主应力的单一、单翼的水平主裂缝。此破裂模式产生的条件为：层理面胶结程度较弱，且裸眼段的层理微裂隙较发育。裸眼段存在沿层理面张开的天然裂隙。满足上述条件之一，则形成第 II 类裂缝。

(3) 模式 III。水力裂缝或沿层理面微裂隙产生起裂，或沿井筒端部产生起裂，之后均垂直井筒轴线垂向延伸，形成垂直水平最小主应力的单一、单翼的垂向主裂缝。此破裂模式产生的条件为：井筒轴线与层理面垂直，井筒方向为水平最小主应力方向。层理面胶结程度较弱，且裸眼段的层理微裂隙较发育。层理面胶结程度较强，且井筒底端出现较强的应力集中。满足上述条件之一，则形成第

III 类裂缝。

(4) 模式 IV。水力裂缝沿井壁与垂向主应力的切面产生起裂，之后沿井筒轴线上、下两翼延伸，延伸过程中，遇软弱面后裂缝尖端发生转向，转向后沿软弱面单翼延伸，形成 L 型交叉网络裂缝。此破裂模式产生的条件为：层理面胶结程度较强，且裸眼段的层理微裂隙不发育。主裂缝贯通软弱面或天然裂隙。同时满足上述 2 个条件，则形成第 IV 类裂缝。

(5) 模式 V。水力裂缝沿层理微裂隙产生起裂，之后沿井筒轴线左、右两翼水平延伸，延伸过程中，遇到软弱面后裂缝尖端发生转向，转向后沿软弱面两翼延伸，形成 T 型交叉网络裂缝。此破裂模式产生的条件为：层理面胶结程度较弱，且裸眼段的层理微裂隙发育。主裂缝贯通软弱面或天然裂隙。同时满足上述 2 个条件，则形成第 IV 类裂缝。

(6) 模式 VI。水力压裂后，试样形成以一条双翼主裂缝为主，2 条尺寸较小的次要裂缝为辅，且 3 条裂缝相互垂直的正交网络裂缝。在 18 个试样中仅 1 个试样出现此类网络裂缝。

表 2 为水力裂缝形态与三向主应力相互关系。从表 2 可知，经水压致裂后，13 个试样形成单一、单翼主裂缝，5 个试样形成交叉网络裂缝。8 个试样形成垂直垂向主应力的主裂缝，7 个试样形成垂直水平最大主应力的主裂缝，3 个试样形成垂直水平最小主应力的主裂缝。结果表明，致密砂岩水压致裂后主要形成单一、单翼的水力裂缝，较少形成网络裂缝。3 个主应力的相对大小和方向并不是决定水力裂缝的起裂与扩展模式的唯一因素。水力裂缝起裂与扩展模式还受到岩石结构和岩石性质的控制，这些控制因素包括层理面的胶结程度、层理微裂隙的发育情况、内部的软弱面和天然裂隙等。

表 2 水力裂缝形态与三向主应力的相互关系

Table 2 Relationships between hydraulic fracture morphology and directions of principle stresses

裂缝形态	试样编号
主裂缝 $\perp \sigma_H$	S-3, S-11, S-19, S-21
主裂缝 $\perp \sigma_V$	S-18, S-14, S-16, S-17, S-22, S-8
主裂缝 $\perp \sigma_h$	S-20, S-7, S-9
主裂缝贯通弱面的网络裂缝	S-24, S-23, S-13, S-15
三向正交网络裂缝	S-12

4.3 水力裂缝起裂压力分析

分析 18 个致密砂岩试样水力裂缝的起裂特点

可知，并筒裸眼段的水力裂缝主要存在沿完整围岩、软弱面、天然裂隙和层理微裂隙产生破裂 4 种起裂模式，如图 11 所示。

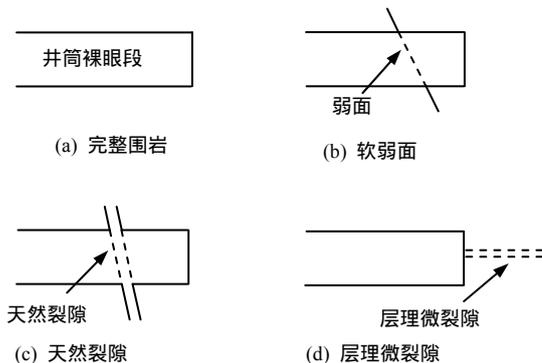


图 11 致密砂岩水力裂缝起裂模式

Fig.11 Modes of hydraulic fracture initiation of tight sandstone

根据上述 4 种起裂模式，将 18 个试样进行分类，结果如表 3 所示。从表 3 可知，致密砂岩的水力裂缝主要沿软弱面或层理微裂隙起裂，仅 5 个试样贯穿完整围岩起裂，2 个试样沿天然裂隙起裂。

表 3 致密砂岩试样的水力裂缝起裂模式

Table 3 Modes of hydraulic fracture initiation of tight sandstone samples

起裂模式	试样编号
完整围岩	S-3, S-9, S-17, S-19, S-20
软弱面或层理微裂隙	S-7, S-8, S-11, S-12, S-13, S-14, S-15, S-18, S-22, S-23, S-24
天然裂隙	S-16, S-21

射孔完井方式的理论破裂压力计算公式异常复杂，涉及的参数也非常多，并且部分参数无法准确测量，此处将忽略 4 个射孔对井壁围岩应力场的影响。由于试样内部的孔隙压力大小直接与裸眼段的泵压密切相关，并且内部孔隙压力不能直接测量，因此将井壁附近孔隙压力近似取为裸眼段的泵压。假设 18 个试样均满足节 3 最后 1 段的理论破裂压力适用条件。在上述假设条件下，将表 4 中各参数代入式(4)~(6)计算 18 个试样的理论破裂压力，计算结果如表 5 所示。

表 5 为致密砂岩水力压裂试验结果。结合表 3 和 5，对比试验破裂压力和理论破裂压力可知：

(1) 水力裂缝沿软弱面或层理微裂隙产生起裂时，试样的试验破裂压力平均值约为 10.38 MPa，

表4 模型参数  
Table 4 Model parameters

饱水抗拉强度/MPa	$\nu$	$\phi/\%$	$\alpha$	$M$	$P_p$
-0.52	0.17	6.70	0.25	0.132	$P_f$

表5 致密砂岩水力压裂试验结果  
Table 5 Results of hydraulic fracture of tight sandstone

试样编号	主裂缝形态	试验破裂压力 $P_{Ff}/\text{MPa}$	稳定压力 $P_E/\text{MPa}$	理论破裂压力/MPa
S-8	主裂缝 $\perp\sigma_v$	12.52	10.82	27.22
S-13	主裂缝 $\perp\sigma_v$	11.63	8.12	27.27
S-14	主裂缝 $\perp\sigma_v$	11.31	7.74	27.29
S-15	主裂缝 $\perp\sigma_v$	8.95	9.31	27.41
S-16	主裂缝 $\perp\sigma_v$	4.64	2.65	27.64
S-17	主裂缝 $\perp\sigma_v$	15.19	7.76	27.08
S-18	主裂缝 $\perp\sigma_v$	9.05	6.27	27.40
S-22*	主裂缝 $\perp\sigma_v$	11.43	4.58	27.28
S-3	主裂缝 $\perp\sigma_H$	18.50	14.51	27.29
S-11	主裂缝 $\perp\sigma_H$	8.22	5.85	27.83
S-12	主裂缝 $\perp\sigma_H$	12.09	8.25	27.63
S-19	主裂缝 $\perp\sigma_H$	20.20	12.75	27.20
S-21	主裂缝 $\perp\sigma_H$	5.28	2.71	27.98
S-23*	主裂缝 $\perp\sigma_H$	10.38	6.66	27.72
S-24*	主裂缝 $\perp\sigma_H$	11.55	6.20	27.66
S-7	主裂缝 $\perp\sigma_h$	11.87	4.40	负值
S-9	主裂缝 $\perp\sigma_h$	17.09	12.56	负值
S-20	主裂缝 $\perp\sigma_h$	22.02	13.06	负值

明显低于最大主应力的 13.12 MPa，远小于理论破裂压力，约为理论破裂压力的 1/3。结果表明，式(4)~(6)不适用于计算沿软弱面或层理微裂隙产生起裂的试样。

(2) 水力裂缝沿完整围岩或射孔根部产生起裂时，试样的试验破裂压力平均值约为 18.60 MPa，明显高于最大主应力 13.12 MPa，其大小约为理论破裂压力的 2/3。虽然试验破裂压力仍然低于理论破裂压力，但其大小已经接近于理论破裂压力。两者的差值主要由两方面原因引起：一方面是射孔降低了岩石的破裂压力<sup>[5]</sup>，另一方面是式(4)~(6)中孔隙压力和系数 $\alpha$ 的取值均为估计值，导致计算结果产生误差。结果表明，式(4)~(6)适用于计算沿完整围岩或射孔根部产生起裂的试样。

(3) 水力裂缝沿天然裂隙产生起裂时，试样的试验破裂压力平均值约为 4.96 MPa，远小于理论破裂压力，约为理论破裂压力的 1/5。结果表明，式(4)~(6)不适用于计算沿天然裂隙产生起裂的试样。

(4) 由于本试验水平最大主应力和垂向主应力非常接近，式(6)中  $P_{hf}$  一般为负值，即为压应力。因此，水力裂缝很难形成垂直最小主应力的裂缝面。然而从试验结果可知，试样 S-7, S-9 和 S-20 形成了第 III 类水力裂缝。详细分析 3 个试样可得到此类裂缝形成的 3 种特殊条件。如图 12 所示，这 3 种特殊条件分别为：① 在井筒底端附近沿层理微裂隙产生起裂；② 在井筒底端应力集中区域产生起裂；③ 在环向射孔处沿射孔根部产生起裂。结果表明，式(6)不适用于计算垂直水平最小主应力的水力裂缝。

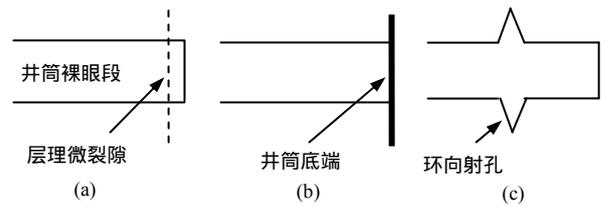


图12 第 III 类水力裂缝的形成条件

Fig.12 Form conditions of hydraulic fracture of mode III

综上所述可知，水力裂缝沿天然裂隙起裂的破裂压力最小，沿软弱面或层理微裂隙起裂的破裂压力次之，沿完整围岩或射孔起裂的破裂压力最大。沿完整围岩或射孔根部起裂的试样适宜用式(4)~(6)计算破裂压力，而其他情况则不适用。

#### 4.4 泵压曲线与破裂特征的相互关系分析

表 6 为泵压曲线与破裂特征的相互关系表，从表 6 可知，18 个试样的泵压曲线可主要分为 4 大类：

(1) 第 1 类泵压曲线的 AB 段呈先减小后增大的规律，其主要对应于单一、单翼的水力裂缝。

(2) 第 2 类泵压曲线的 AB 段呈单调递减的规律，其主要对应于由单翼的水力裂缝贯通软弱面形成的交叉网络裂缝(试样 S-13, S-24)，或单一、单翼的水力裂缝(试样 S-22)。

(3) 第 3 类泵压曲线的 AB 段呈锯齿状变化规律，其主要对应于由一条双翼的水力裂缝为主，两条单翼的次要裂缝为辅，形成 3 条相互垂直水力裂缝组成的正交网络裂缝(试样 S-12)。

(4) 第 4 类泵压曲线的 BC 段呈锯齿状变化规律，其主要对应于由双翼的水力裂缝贯通软弱面形成的交叉网络裂缝(试样 S-15)。

致密砂岩储层经水压致裂后，可根据上述泵压曲线特征与水力裂缝的相互关系，初步判断水力裂缝的形态，预测储层水压致裂的改造效果。

表 6 泵压曲线与破裂特征相互关系

Table 6 Relationship of fracture morphologies and the pumping pressure curves

分类	曲线特征	典型试样破坏形态	满足条件试样编号
第 1 类	<p>泵压/MPa</p> <p>注入水量/mL</p> <p>时间/s</p> <p>泵压</p> <p>注入水量</p> <p>试样 S-3</p>	<p>试样 S-3</p>	<p>S-3, S-7,</p> <p>S-8, S-9,</p> <p>S-11, S-14,</p> <p>S-16, S-17,</p> <p>S-18, S-19,</p> <p>S-20, S-21,</p> <p>S-23</p>
第 2 类	<p>泵压/MPa</p> <p>注入水量/mL</p> <p>时间/s</p> <p>泵压</p> <p>注入水量</p> <p>试样 S-13</p>	<p>试样 S-13</p>	<p>S-13,</p> <p>S-22,</p> <p>S-24</p>
第 3 类	<p>泵压/MPa</p> <p>注入水量/mL</p> <p>时间/s</p> <p>泵压</p> <p>注入水量</p> <p>试样 S-12</p>	<p>试样 S-12</p>	<p>S-12</p>
第 4 类	<p>泵压/MPa</p> <p>注入水量/mL</p> <p>时间/s</p> <p>泵压</p> <p>注入水量</p> <p>试样 S-15</p>	<p>试样 S-15</p>	<p>S-15</p>

## 5 影响因素分析

### 5.1 排量的影响

图 13 为致密砂岩水力裂缝的破裂压力与排量

的关系。从图 13 可知，致密砂岩水力裂缝的破裂压力与排量主要呈正相关的关系，注入排量越大，破裂压力越大。水力裂缝的破裂压力受到岩石性质和水力裂缝形态的影响，因此试验结果离散性较大。

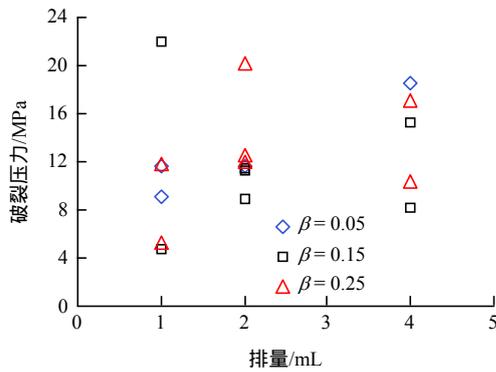


图 13 排量与破裂压力的关系

Fig.13 Relationship between delivery capacity and fracture pressure

### 5.2 地应力差异系数的影响

图 14 为致密砂岩水力裂缝的破裂压力与地应力差异系数的关系。从图 14 可知，随地应力差异系数不断增大，破裂压力没有明显规律。由于采用露头试样进行试验，因此试样内部层理面、软弱面和天然裂隙对试验结果干扰较大，很难准确得到地应力差异系数与破裂压力的关系。在后续的试验中，建议选择须家河组其他层位岩性更加均质、层理面不发育的致密砂岩进行试验，从而更加准确地了解地应力差异系数对致密砂岩破裂特征和延伸规律的影响。

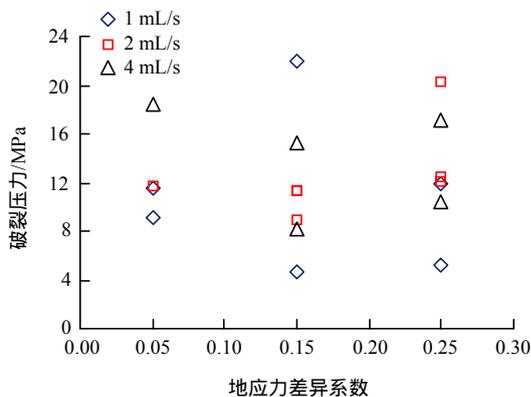
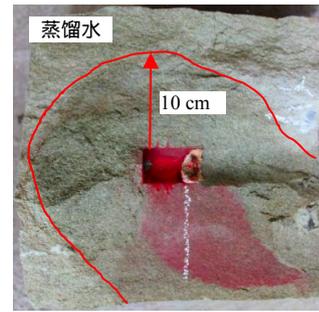


图 14 地应力差异系数与破裂压力的关系

Fig.14 Relationship between ground stress difference coefficient and fracture pressure

### 5.3 压裂液类型的影响

图 15 为使用蒸馏水和液压油将致密砂岩水压致裂后的裂缝形态图。图 15(a)中实线条所圈区域为蒸馏水的滤失区，滤失区边界距井筒约 10 cm，滤失区范围较大，蒸馏水的滤失效应非常明显。因此，计算井壁围岩应力场时必须考虑滤失效应引起的附



(a) 蒸馏水



(b) 液压油

图 15 不同压裂液类型水压致裂后破裂形态

Fig.15 Fracture morphologies of hydraulic fracture by using different fracture fluids

加应力，而且在拉伸强度准则中也必须使用饱水试样的抗拉强度。图 15(b)中仅染色区域周边被润湿，滤失范围非常小，液压油的滤失效应很弱，可忽略滤失效应。

## 6 结论

(1) 致密砂岩水力裂缝的起裂模式主要有 4 种基本模式：① 水力裂缝沿完整围岩或射孔根部起裂；② 水力裂缝沿软弱面起裂；③ 水力裂缝沿层理微裂隙起裂；④ 水力裂缝沿天然裂隙起裂。水力裂缝的裂缝形态主要有 4 种：水力裂缝垂直水平最大主应力、水力裂缝垂直垂向应力、水力裂缝垂直水平最小主应力以及水力裂缝贯通软弱面形成的网络裂缝。

(2) 致密砂岩水压致裂后主要形成单一、单翼的水力裂缝，较少形成交叉网络裂缝。岩石性质是控制水力裂缝的起裂与扩展模式的主要因素之一。这些岩石性质主要包括层理面的胶结程度、层理微裂隙的发育情况、内部的软弱面和天然裂隙。

(3) 满足第 1 类曲线的试样经水压致裂后易形成单一、单翼的水力裂缝；满足第 2~4 类曲线的试样经水压致裂后易形成交叉网络裂缝。

(4) 水力裂缝的破裂压力与排量呈正相关的关系，而与地应力差异系数没有明显规律。蒸馏水作为压裂液时，必须考虑滤失效应的影响。而液压油作为压裂液时，可忽略滤失效应。

#### 参考文献(References)：

- [1] 李建忠, 郭彬程, 郑民, 等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 607–615. (LI Jianzhong, GUO Bincheng, ZHENG Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in china[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607–615. (in Chinese))
- [2] DANESHY A A. Rock properties controlling hydraulic fracture propagation[R]. SPE 5752, 1976.
- [3] DANESHY A A. Experimental investigation of hydraulic fracturing through perforations[R]. JPT 1973: 1 201–1 206.
- [4] BEHRMANN L A, ELBEL J L. Effect of perforations on fracture initiation[J]. Journal of Petroleum Technology, 1991, 43(5): 608–615.
- [5] ABASS H H, MEADOWS D L. Oriented perforations—a rock mechanicals view[R]. SPE 2855, 1994.
- [6] 陈青. 川西须家河组致密储层破裂压力研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2007. (CHEN Qing. Fracture pressure study of tight reservoir in Xujiahe gas reservoir of west Sichuan[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [7] 张矿生, 樊凤玲, 雷鑫. 致密砂岩与页岩压裂网形成能力对比评价[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(14): 185–211. (ZHANG Kuangsheng, FAN Fengling, LEI Xin. Comparing evaluation of the ability of forming fracture network in tight sand reservoir and shale reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(14): 185–211. (in Chinese))
- [8] 衡帅, 杨春和, 郭印同, 等. 层理对页岩水力裂缝扩展的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 228–237. (HENG Shuai, YANG Chunhe, GUO Yintong, et al. Effect of bedding planes on hydraulic fracture propagation in shale formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 228–237. (in Chinese))
- [9] 李芷, 杨春和, 曾义金, 等. 页岩水力压裂水力裂缝与层理面扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 12–20. (LI Zhi, YANG Chunhe, ZENG Yijin, et al. The fracturing mechanics of hydraulic fracture and bedding planes in shale in hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 12–20. (in Chinese))
- [10] 王鸿勋. 水力压裂原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 3–6. (WANG Hongxun. Principle of hydraulic fracturing[M]. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 2011: 3–6. (in Chinese))