

doi : 10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 08. 026

# 页岩气储层水力裂缝网络的延伸规律

夏彬伟<sup>1,2</sup>, 杨冲<sup>1,2</sup>, 卢义玉<sup>1,2</sup>, 宋晨鹏<sup>1,2</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 400030 ;  
2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400030 )

**摘 要 :** 为了深入认识页岩气储层水力压裂裂缝的延伸规律及裂缝网络形成条件 , 通过建立页岩气储层水力裂缝延伸的二维模型 , 分析地应力差异系数、天然裂缝及层理面等因素对水力裂缝延伸方向的影响规律 , 并对页岩储层水力裂缝网络的形成机制进行研究 . 研究结果表明 : 水力裂缝在层理面内转向、分岔及沟通天然裂缝是形成裂缝网络的关键 , 层理面和天然裂缝逼近角和地应力差异系数需在一定临界组合条件下才形成裂缝网络 , 偏离该条件均形成单一裂缝 , 最大水平主应力方向与页岩的层理面和开度较好的天然裂缝之间的逼近角呈大角度时 , 更有利于形成裂缝网络 .

**关 键 词 :** 页岩气 ; 水力压裂 ; 裂缝网络 ; 地应力差异系数

中图分类号 : TD 712      文献标志码 : A      文章编号 : 1005 - 3026( 2016 ) 08 - 1193 - 06

## Hydraulic Fracture Network Propagation Rule of Shale Reservoir

XIA Bin-wei<sup>1,2</sup>, YANG Chong<sup>1,2</sup>, LU Yi-yu<sup>1,2</sup>, SONG Chen-peng<sup>1,2</sup>

( 1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control , Chongqing University , Chongqing 400030 , China ; 2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Gas Drainage in Complex Coal Seam , Chongqing University , Chongqing 400030 , China. Corresponding author : XIA Bin-wei , E-mail : xbwei33@cqu.edu.cn )

**Abstract :** To deeply understand the hydraulic fracturing crack propagation rule of shale gas reservoir and crack network formation conditions , a two-dimensional model of hydraulic fracture extension in shale was established. The influence of in-situ stress difference coefficient , natural fracture and bedding plane on hydraulic fracture extension was analyzed , and the mechanism of hydraulic fracture network formation was studied. The results show that the steering and bifurcation of hydraulic fracture along the bedding plane and coalescence into natural fracture are the keys to the formation of crack network. Crack network can form on condition that the approaching angle between bedding plane and natural fractures and the stress difference coefficient are combined properly with critical values , or a single crack will form. The fracture network in shale gas reservoir is easy to form when the angle is large between the maximum horizontal principal stress direction and bedding plane or natural open fracture.

**Key words :** shale gas ; hydraulic fracturing ; crack network ; stress difference coefficient

页岩气是常规油气资源最现实的接替资源之一<sup>[1]</sup> , 目前对储层进行压裂改造以产生不规则、不对称的复杂裂缝网络是页岩气开采的核心技术之一 . 由于储层的低孔和低基质渗透率 , 完井后只有少数天然裂缝较为发育的井可直接投入生产 .

由于目前页岩气藏复杂的储层结构以及构造应力场 , 现场无法对地下裂缝进行有效的监测 , 因此不能保证网状裂缝的形成 , 也无法对地下储层水力压裂效果进行直接观测 . 因此 , 探明和掌握页岩水力压裂裂缝的形态分布、延伸规律和影响因素是

收稿日期 : 2015 - 04 - 08  
基金项目 : 国家重点基础研究发展计划项目( 2014CB239206 ) ; 长江学者和创新团队发展计划项目( IRT13043 ) ; 国家自然科学基金资助项目( 51374258 , 51104191 ) .  
作者简介 : 夏彬伟( 1978 - ) , 男 , 重庆人 , 重庆大学副教授 , 博士 ; 卢义玉( 1972 - ) , 男 , 湖北京山人 , “ 长江学者奖励计划 ” 特聘教授 , 重庆大学教授 , 博士生导师 .

页岩气高效开采迫切需要解决的关键问题之一 , 对页岩储层压裂钻井布置及提高采收效率等至关重要.

目前 , 针对水力压裂裂缝延伸和裂缝网络的形成机理 , 国内外学者做了一些相关研究. 程万等<sup>[2]</sup>研究发现 , 当水平应力差大于一个临界值时 , 水力裂缝可能将穿过天然裂缝 ; Warpinski 等<sup>[3-5]</sup>通过现场试验发现主裂缝和分支裂缝同时扩展的现象 , 提出裂缝扩展带的概念 ; Mahrer 等<sup>[6]</sup>认为天然裂缝发育的地层压裂后将形成复杂网状裂缝 ; 宋晨鹏等<sup>[7]</sup>基于理论分析及数值模拟的方法研究了煤系地层下煤岩交界面对裂缝扩展的影响 , 结果表明 , 水平主应力差、最小水平主应力以及相交角是影响裂缝扩展及形态的主要因素 ; Dyneshy<sup>[8-9]</sup>认为岩石的非稳态扩展机制是由于岩石内部产生了剪切型破坏 ; 姜浒等<sup>[10]</sup>研究发现 , 如果压裂施工时泵压和排量超过一个临界值 , 则趋于形成裂缝网络. 然而 , 针对页岩压裂中存在的裂缝延伸及各因素对裂缝网络形成的影响机理的研究仍然不够全面.

因此 , 本文在相关学者研究的基础上 , 针对水压致裂页岩裂缝的延伸形态、规律和影响因素等 , 建立页岩层水力压裂的理论模型 , 基于相关弹塑性力学理论及 RFPA<sup>2D</sup> - Flow 数值模拟 , 研究构造应力、天然裂缝、层理面特征等不可控因素对裂缝延伸规律的影响 , 分析页岩储层中裂缝网络形成条件 , 为现场页岩气高效开采提供理论支撑.

1 水力裂缝延伸机制

1.1 层理面影响机制

如图 1 所示 , 水力裂缝在远场沿着最大水平主应力方向延伸. 研究井眼条件下裂缝水平延伸规律问题时不考虑裂缝高度的扩展 , 通常对模型进行水平剖切 , 将其简化为二维模型 , 研究裂缝在水平方向上的延伸规律.

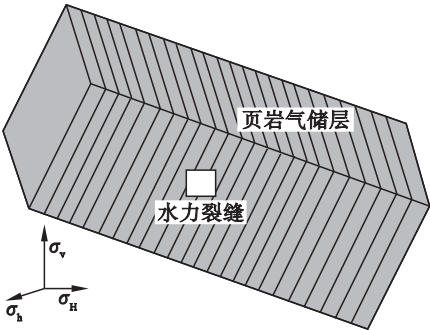


图 1 水压致裂三维模型  
Fig. 1 3D model of hydraulic fracturing

由于层理面的存在 , 延伸中的裂缝与层理面相互干扰时可能出现以下情况 : ①裂缝沿着最大水平主应力方向直接穿过层理面 , 形成单一裂缝 ; ②水力裂缝沿层理面延伸 , 形成单一裂缝 ; ③裂缝在延伸过程中 , 遇到弱层理面后发生交叉转向 ; ④水力裂缝在延伸过程中 , 遇到弱层理面不断发生偏转 , 形成复杂的裂缝网络.

根据相关断裂力学理论 , 裂缝在岩石中扩展的临界水压为

$$p_{\text{net}}^{(1)} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{(1-\nu^2)\pi a}} + \sigma_h. \tag{1}$$

式中  $E$ 、 $\gamma$ 、 $\nu$  分别为目标页岩的弹性模量、单位面积表面能、泊松比 ;  $a$  为裂缝的半长.

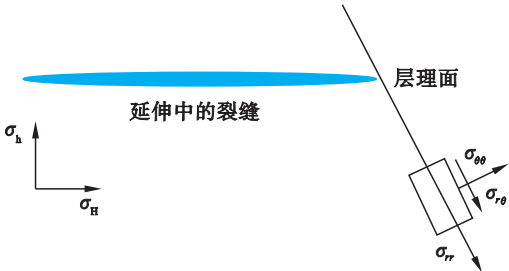


图 2 裂缝延伸至层理面  
Fig. 2 Crack extending to bedding plane

如图 2 所示 , 当水力裂缝与层理面接触时 , 将裂缝尖端应力场转化到极坐标系中 , 有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= p \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) - p, \\ \sigma_{\theta\theta} &= p \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos^3 \frac{\theta}{2} - p, \\ \sigma_{r\theta} &= p \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2}. \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

在远场应力作用下 , 层理面上的正应力与剪应力可以表示为

$$\sigma_n = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta. \tag{3}$$

$$\tau = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta, \tag{4}$$

因此 , 根据二维弹性理论 , 在远场应力及内水压力的作用下 , 层理面上的正应力与剪应力可以表示为

$$\sigma_n = \sigma_n^\infty - \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \cos 2\theta - p \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos^3 \frac{\theta}{2} + p, \tag{5}$$

$$\tau = \sigma_{r\theta} + \tau^\infty = p \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \sin 2\theta. \tag{6}$$

在计算中,可认为  $\sigma_n < 0$  时,层理面张开;  
 $\tau > c$  时,层理面产生剪切破坏,即可产生导流通道,于是流体净压力

$$p_{\text{net}}^{(2)} > 2c - (\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\theta / \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (7)$$

时,层理面产生剪切破坏.

式中  $\tau$  和  $\sigma_n$  分别为层理面的剪应力和正应力; $c$  为层理面的黏聚力,表征层理面的胶结程度.

1.2 天然裂缝影响机制

图 3 为裂缝在远场沿着水平主应力方向与一条中等程度的闭合天然裂缝相交, $\varphi$  为天然裂缝与最大水平主应力方向的逼近角.基于上文分析,裂缝可能沿着层理面延伸与天然裂缝相交,或者穿过层理面沿最大水平主应力方向延伸相交于天然裂缝.本文分析裂缝延伸至层理面之后的延伸规律.为便于分析,假设天然裂缝贯穿数个层理面,端部止于基质而非层理面.

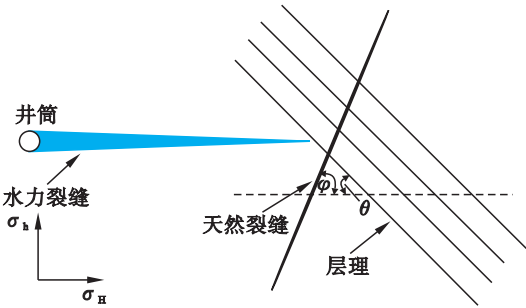


图 3 页岩储层压裂二维模型  
Fig. 3 2D model of shale reservoir fracturing

当水力裂缝与天然裂缝相交时,若天然裂缝不张开,则水力裂缝直接穿过天然裂缝继续延伸.根据式(5),当天然裂缝面  $\sigma_n^\infty < \sigma_{\theta\theta}$  时发生张性破裂,整理可得所需缝内流体净压力:

$$p_{\text{net}}^{(3)} > \frac{(\sigma_H - \sigma_h) \sin^2 \varphi + 2\sigma_h}{2\sqrt{\frac{a}{2r}} \cos^3 \frac{\varphi}{2}} \quad (8)$$

当天然裂缝张开,压裂流体充满裂缝使其膨胀,当天然裂缝为剪切破裂时,根据式(7),所需缝内流体净压力为

$$p_{\text{net}}^{(4)} > 2c_0 - (\sigma_H - \sigma_h) \sin 2\varphi / \sin \varphi \cos \frac{\varphi}{2} \sqrt{\frac{a}{2r}} \quad (9)$$

式中  $c_0$  为页岩层基质的内聚力.分析式(7)和式(9)可知,当  $\theta = \varphi$  时,剪切破坏先于层理面出现.

基于以上分析,目标页岩中裂缝的延伸情况取决于裂缝在层理面及天然裂缝下产生剪切滑移

所需的临界水压,即取决于水平主地应力差、层理面逼近角  $\theta$ 、天然裂缝的逼近角  $\varphi$ ,以及页岩自身层理面强度等.

1.3 裂缝延伸形态分析

1)  $\min[p_{\text{net}}^{(1)} p_{\text{net}}^{(2)} p_{\text{net}}^{(3)} p_{\text{net}}^{(4)}] = p_{\text{net}}^{(1)}$  且其值相差很大时,水力裂缝将穿透层理面及天然裂缝,形成单一裂缝.此延伸模式发生在层理面胶结性较强、水平主应力差较大、层理逼近角  $\theta$  及天然裂缝逼近角  $\varphi$  较大时.

2)  $\min[p_{\text{net}}^{(1)} p_{\text{net}}^{(2)} p_{\text{net}}^{(3)} p_{\text{net}}^{(4)}] = p_{\text{net}}^{(2)}$  且其值相差很大时,水力裂缝沿层理面产生剪切滑移,形成单一裂缝.此延伸模式发生在水平主地应力差相对较小、层理面胶结强度较低,或天然裂缝发育及层理逼近角  $\theta$  也不大时.

3)  $\min[p_{\text{net}}^{(1)} p_{\text{net}}^{(2)} p_{\text{net}}^{(3)} p_{\text{net}}^{(4)}] = p_{\text{net}}^{(3)}$  时,天然裂缝在内水压力的作用下张开,此时裂缝沿裂缝延伸所需最小水压方向延伸;当  $\min[p_{\text{net}}^{(1)} p_{\text{net}}^{(2)}, p_{\text{net}}^{(4)}] = p_{\text{net}}^{(4)}$  且其值相差很大时,压裂流体充满天然裂缝,水力裂缝沿其端部开裂,形成交叉裂缝.此破裂模式发生在层理面胶结强度较高、水平主地应力差相对较小、层理逼近角  $\theta$  较大,以及天然裂缝逼近角  $\varphi$  较小时.

4) 当  $p_{\text{net}}^{(1)} p_{\text{net}}^{(2)} p_{\text{net}}^{(3)} p_{\text{net}}^{(4)}$  函数值相差不大时,裂缝沿各个方向延伸均有可能,另外由于裂缝延伸方向的随机性,当裂缝延伸至层理面时,方向可能不断发生转变,因此较易形成网状裂缝.此延伸模式多针对层间节理强度适中的页岩层.

实际上,在各种因素影响下不同层理面之间的力学性质也可能有差异.此处分析层理强度一致时的裂缝延伸形态,同样具有普适性.

2 裂缝延伸形态数值分析

本文利用东北大学开发的岩石真实破裂过程分析(realistic failure process analysis)的渗流应力耦合分析系统 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 软件,对页岩在高压水作用下的延伸规律进行数值模拟.

模型采用长方形层状结构模拟地层状况.模型范围为 20 m × 20 m,划分为 400 × 400 = 160 000 个单元.将水平主地应力简化为均布荷载施加于模型边界.模型中建立倾斜条块表示页岩层理面,其力学参数按重庆某地区页岩露头情况给定.在模型中部开挖一长轴为 1.5 m,短轴为 0.2 m 的椭圆,表示延伸中的水力裂缝,缝内水压视边界条件施加.另外在水力裂缝延伸方向开挖一贯穿层理面的闭合裂缝,表示天然裂缝,如图 4 所示.

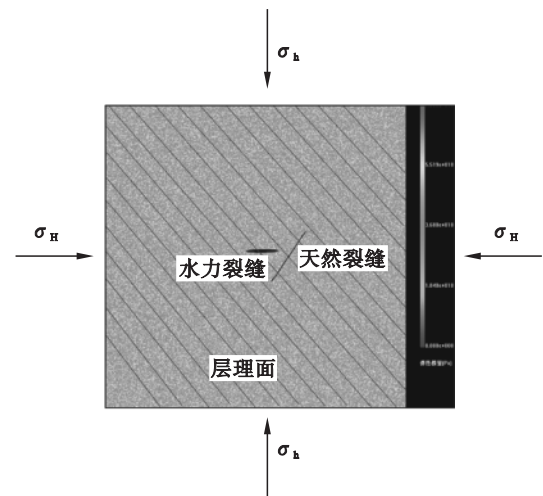


图 4 数值分析模型  
Fig. 4 Numerical analysis model

2.1 水平主地应力及逼近角对裂缝延伸形态的影响

水平主应力差、最大水平主应力方向与层理面和天然裂缝的逼近角  $\theta$ 、 $\varphi$  均对水力裂缝(以下简称裂缝)延伸情况、形态特征有影响,此外最小水平主应力  $\sigma_h$  也有影响,因此引入地应力差异系数  $K_a = (\sigma_H - \sigma_h) / \sigma_h$  进行分析.本节进行正交试验模拟分析,采用  $L_9(3^4)$  正交表,共进行 9 组模拟.根据目前页岩压裂现场条件,模拟相关力学参数见表 1~表 3.

表 1 地应力参数  
Table 1 Stress parameters

最大水平主应力 $\sigma_H/\text{MPa}$	最小水平主应力 $\sigma_h/\text{MPa}$	地应力差异系数 $K_a$
20	18	0.11
20	16	0.25
20	14	0.43

表 2 正交模拟参数组合

Table 2 Orthogonal simulation parameter combination

组别	因素		
	地应力差异系数 $K_a$	$\theta/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
a	0.11	30	30
b	0.11	50	50
c	0.11	70	70
d	0.25	30	50
e	0.25	50	70
f	0.25	70	30
g	0.43	30	70
h	0.43	50	30
i	0.43	70	50

表 3 页岩储层力学参数 Table 3 Mechanical parameters of shale reservoirs		
力学参数	页岩基质	层理面
均值度	3	3
内摩擦角/ $(\circ)$	30	33
抗压强度(黏聚力) /MPa	110	9
压拉比	10	10
残余强度系数	0.1	0.1
孔隙水压系数	0.6	0.6
渗透系数/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	0.01	0.02
泊松比	0.3	0.35
孔隙率/%	2	3

模拟结果如图 5 所示.在地应力差异系数为 0.11 的图 5a~c 组模拟中,  $\theta = \varphi$ , 当延伸中的裂缝先后与层理面及天然裂缝相交时,随着逼近角度的增加,裂缝从沿着层理面及天然裂缝延伸逐渐趋于穿过层理面及天然裂缝,否则裂缝趋于沿层理面延伸进而沟通天然裂缝形成裂缝网络;  $\theta = 30^\circ$  (图 5a,d,g) 及  $\varphi = 30^\circ$  (图 5a,f,h) 中,随着地应力差异系数的增加,当裂缝延伸至层理面及天然裂缝时,从沿着层理面及天然裂缝延伸逐渐趋于穿过层理面及天然裂缝.分析可知,在形成裂缝网络的模拟组合中,裂缝一致沟通了天然裂缝且裂缝在层理面内产生了分岔转向,因此层理面和天然裂缝逼近角、地应力差异系数必须在一定临界组合条件下才能形成裂缝网络,偏离该条件均形成单一裂缝.

2.2 层理面强度影响

根据图 5e 模拟结果可知,裂缝出现沿层理面以及穿过层理面共存的情况,从而形成网状裂缝,因此为研究层理面强度对裂缝延伸及裂缝网络形成的影响,改变层理面黏聚力的大小,参数如下:图 5e 的黏聚力为 9 MPa,图 6a,b 的黏聚力分别为 7 和 11 MPa.模拟结果如图 5e、图 6 所示.

在图 6a 中,当裂缝延伸至左侧层理面时,裂缝沿层理面产生剪切破坏进而延伸,而右侧出现裂缝沿着层理与穿过层理双向延伸的情况,其原因为裂缝延伸至天然裂缝与层理交界处,由于应力集中而产生.如图 6b 所示,当层理面强度加大,裂缝直接穿过层理面延伸,当与天然裂缝相交时,由于天然裂缝的逼近角度大,裂缝仍然穿过天然裂缝不改变方向.因此,层理面的强度对页岩气储层水力压裂裂缝网络的形成具有重要影响,层间强度过大或过小都不利于裂缝网络的形成,而天然裂缝的存在是裂缝网络形成的关键.



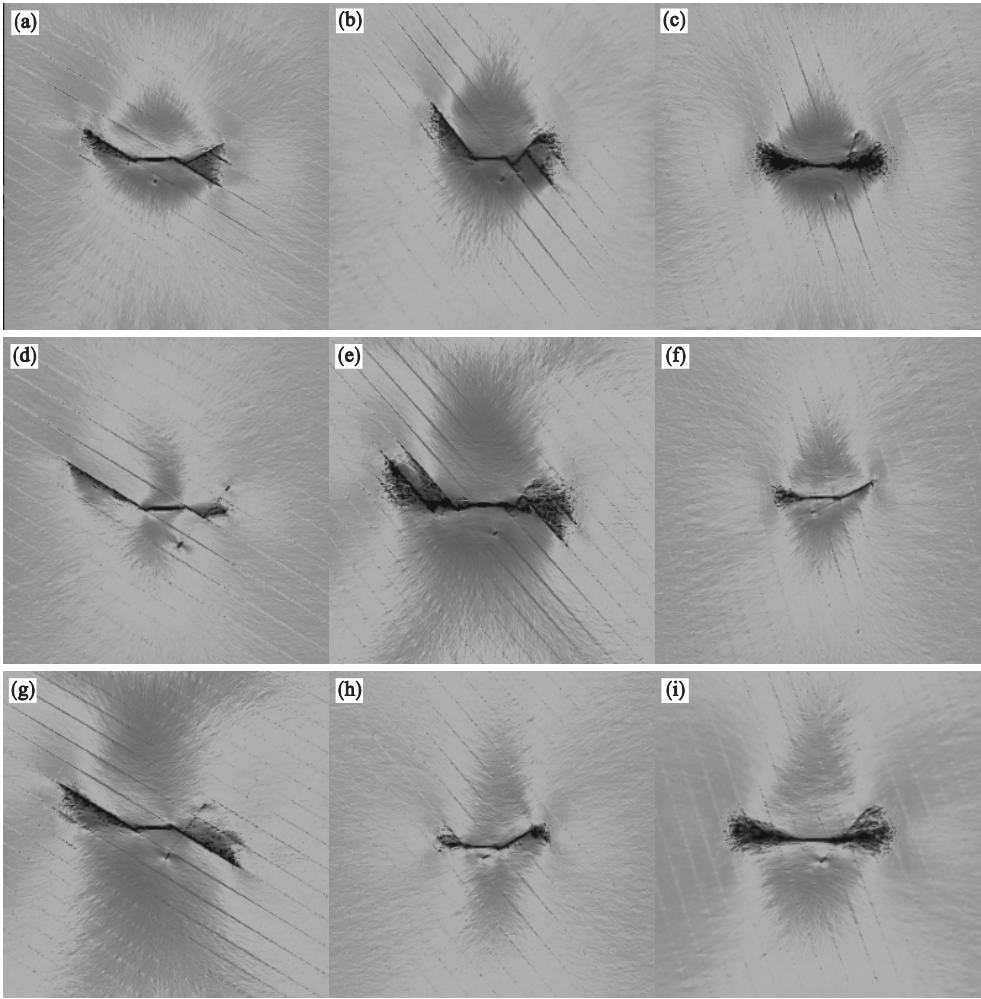


图 5 最大剪应力场云图

Fig. 5 The maximum shear stress field nephogram

( a )—  $K_a=0.11$   $\theta=30^\circ$   $\varphi=30^\circ$  ; ( b )—  $K_a=0.11$   $\theta=50^\circ$   $\varphi=50^\circ$  ; ( c )—  $K_a=0.11$   $\theta=70^\circ$   $\varphi=70^\circ$  ;  
( d )—  $K_a=0.25$   $\theta=30^\circ$   $\varphi=50^\circ$  ; ( e )—  $K_a=0.25$   $\theta=50^\circ$   $\varphi=70^\circ$  ; ( f )—  $K_a=0.25$   $\theta=70^\circ$   $\varphi=30^\circ$  ;  
( g )—  $K_a=0.43$   $\theta=30^\circ$   $\varphi=70^\circ$  ; ( h )—  $K_a=0.43$   $\theta=50^\circ$   $\varphi=30^\circ$  ; ( i )—  $K_a=0.43$   $\theta=70^\circ$   $\varphi=50^\circ$  .

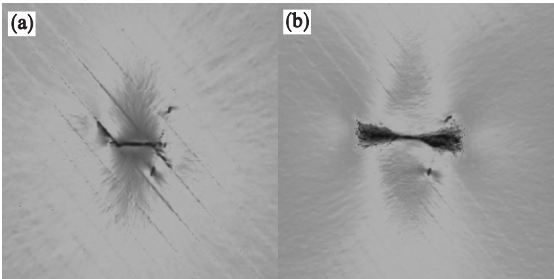


图 6 模拟结果

Fig. 6 Simulation results

( a )—黏聚力为 7 MPa ; ( b )—黏聚力为 11 MPa.

3 结 论

1 ) 基于弹性及断裂力学理论 , 给出了井眼条件下裂缝在层理面和天然裂缝端部产生张性及剪切破坏的临界水压 , 并得出了水压致裂页岩裂缝

网络的形成条件.

2 ) 理论及模拟结果表明 , 随着地应力差异系数及层理面强度的增大 , 裂缝趋于穿过层理面形成沿最大主应力方向延伸的单一裂缝 ; 最大水平主应力方向与页岩的层理面及开度较好的天然裂缝之间的逼近角呈大角度时 , 更有利于裂缝网络的形成.

3 ) 天然裂缝和层理面的发育程度与裂缝网络的形成密切相关 , 水力裂缝在层理面间分岔以及主裂缝与天然裂缝沟通是形成裂缝网络的关键 . 地应力差异系数、层理面及天然裂缝逼近角须在一定临界组合条件下才能形成裂缝网络 , 偏离该条件均产生单一裂缝 ; 当页岩层间界面强度适中时 , 裂缝网络的形成主要与地应力组合及天然裂缝特征有关.

( 下转第 1211 页 )