

DOI: 10.7511/jslx201605017

横观各向同性油气藏水力压裂裂纹扩展规律研究

孙可明*, 张树翠, 李天舒

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 阜新 123000)

摘要:针对横观各向同性与各向同性油气藏水力压裂裂纹扩展的差异性,基于扩展有限元法建立水力压裂力学模型,通过ABAQUS子程序开发了各向同性和横观各向同性岩体的起裂判据。在各向同性岩体数值模拟结果与解析解以及现场压裂典型曲线对比吻合的基础上,得到了包含层理构造的横观各向同性岩体水力压裂过程中裂纹扩展规律。层理类岩体水力压裂的裂缝扩展方向由地应力状态、层理方向以及岩体与层理界面抗拉强度共同决定;水力压裂过程中,注水压力在裂纹尖端产生应力集中,层理面法向分量先达到界面抗拉强度时,裂纹沿层理方向开裂,反之裂纹沿垂直最小地应力的方向扩展;裂纹扩展速度随层理抗拉强度的增加而降低;由于地层的滤失,随压裂液的注入,裂纹长宽尺度增长速率降低。

关键词:水力压裂;起裂判据;裂纹扩展;扩展有限元;横观各向同性

中图分类号: O352; O346.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2016)05-0767-06

1 引言

水力压裂方法是利用高压泵组以远超过地层吸收能力的排量泵入井底高粘度液体,最终压破地层形成裂缝,是油气井增产增注的主要方法,特别是提高低渗透油气藏产能的有效手段,水力压裂中裂纹的起裂与扩展是压裂作业成败的关键。现场试验具有成本高和检测困难的特点,数值计算可以直观地显示不同工况下裂纹扩展方位及长宽尺度的变化规律,为现场作业提供指导。Alfano等^[1]为了研究节理面开裂开发了内聚力模型,Wangen^[2]基于岩石 Biot 方程和破裂压力的有限元表示,建立了宏观尺度上岩石水力压裂非均匀有限元模型。Barbieri等^[3]建立了三维无网格裂纹扩展模型,将裂纹扩展转换为运动学问题。Almia等^[4]假定裂纹的扩展发生在预定弱面内,基于能量公式提出了水力压裂准静态裂纹扩展变分模型。连志龙等^[5,6]通过在裂纹可能影响区内细化网格建立了水力压裂三维流固耦合有限元模型,孙可明等^[7]利用粘结单元建立了页岩损伤开裂模型,张洪新等^[8]利用边界元和有限元法建立了水力压裂数值模型。目前,常见粘聚力模型、自适应网格法、无网格模型以及边

界元方法在处理复杂裂纹任意路径扩展问题时普遍存在局限性,如裂纹扩展路径必须预先给定、裂纹只能沿着单元界面扩展、计算成本偏高、强奇异性及求解困难等。扩展有限元法允许裂纹从单元边界和单元内部穿过,可以在规则网格上计算复杂形状裂纹,不需给定裂纹扩展路径,无需对裂纹尖端重新划分网格,节省了计算成本,成为解决复杂断裂问题最有效的方法。文献[9,10]分别对扩展有限元和广义扩展有限元在裂纹问题上的应用进行了探讨和研究。

此外,大多学者将水力压裂过程中的岩体视为各向同性介质,或者考虑到岩体中的天然裂缝。目前,层理类油气藏亟待开发,根据2013年6月美国能源信息署(EAI)发布的报告,世界页岩气可采储量约相当于当前天然气总量的32%。然而,岩体种类的不同导致层理类岩体水力压裂与常规储层水力压裂裂纹扩展规律差异较大,对于层理类岩体水力压裂规律研究较少。王倩等^[11]提出了页岩力学参数各向异性,认为页岩可假设为横观各向同性介质。贾长贵等^[12,13]对层状页岩破坏模式的研究提出层理面的定向沉积影响其强度、变形以及破坏模式。本文通过子程序开发建立了适用于均质和层理类岩体的起裂判据,研究层理类岩体的裂纹扩展规律。

收稿日期:2015-05-15;修改稿收到日期:2015-09-24.

基金项目:国家自然科学基金(11072103)资助项目.

作者简介:孙可明*(1968-),男,博士,教授

(E-mail:sskkmm11@163.com)

2 水力压裂裂纹扩展模型

2.1 断裂问题的扩展有限元原理

扩展有限元法通过在裂纹面和裂纹尖端引入扩充形函数,复杂未知场 u 在扩展有限元中表示为

$$u = \sum_{I=1}^N N_I(x) [u_I + H(x) a_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_\alpha(x) b_I^\alpha] \quad (1)$$

式中 $N_I(x)$ 为常规形函数, u_I 为连续部分有限元解, a_I 为开裂单元节点扩充自由度,跳跃函数 $H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$ 在裂纹穿过单元内部时得到激活, b_I^α 为裂尖节点扩充自由度, $F_\alpha(x)$ 为裂尖应力近似函数, $\sum_{\alpha=1}^4 F_\alpha(x) b_I^\alpha$ 描述裂尖附近奇异解,如图 1 所示。

2.2 岩体水力压裂本构模型

岩体弹性阶段本构矩阵为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon \\ \gamma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma \\ \tau \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式中 } \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \end{Bmatrix}, \gamma = \begin{Bmatrix} \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}, \sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \end{Bmatrix}, \tau = \begin{Bmatrix} \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{Bmatrix}$$

各向同性岩体:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{G} & & \\ & \frac{1}{G} & \\ & & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

横观各向同性岩体:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_p}{E_p} & -\frac{\nu_{tp}}{E_t} \\ -\frac{\nu_p}{E_p} & \frac{1}{E_p} & -\frac{\nu_{tp}}{E_t} \\ -\frac{\nu_{pt}}{E_p} & -\frac{\nu_{pt}}{E_p} & \frac{1}{E_t} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{G_p} & & \\ & \frac{1}{G_t} & \\ & & \frac{1}{G_t} \end{bmatrix}$$

岩体开裂满足牵引分离法则:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} \quad (3)$$

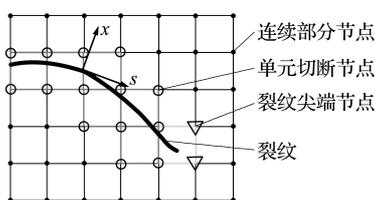


图 1 扩充形函数节点形式

Fig. 1 Node form of enrichment shape functions

$$\begin{cases} t_n = (1 - D) \bar{t}_n \\ t_s = (1 - D) \bar{t}_s \quad (\bar{t}_n \geq 0) \\ t_t = (1 - D) \bar{t}_t \end{cases} \quad (4)$$

式中 \mathbf{t} 为牵引力向量,包含法向分量 t_n 和两个切向分量 t_s 和 t_t , $\boldsymbol{\delta}$ 为岩体分离位移,包含法向分量 δ_n 和两个切向分量 δ_s 和 δ_t , \mathbf{K} 为材料刚度矩阵, \bar{t}_n , \bar{t}_s 和 \bar{t}_t 分别为单元未开裂情况下应力分量的预测值, $\bar{t}_n < 0$ 时, $D = 0$, D 为损伤变量。

$$D = \delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0) / [\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)] \quad (5)$$

式中 $0 \leq D \leq 1$, $\delta_m^f = 2G_{ec} / T_c^0$, T_c^0 为初始起裂时的有效拉应力, δ_m^0 为裂纹起裂时上下表面之间距离, δ_m^{\max} 为加载过程中单元上下两表面之间有效位移的最大值, G_{ec} 为等效临界断裂能释放率,由裂纹演化过程中断裂能释放率得出。

单元未起裂时, $D = 0$; 裂纹演化阶段, $0 < D < 1$; 单元完全开裂, $D = 1$, 如图 2 所示。

单元的初始起裂损伤由子程序 UDAMINI 实现。通过程序读取应力状态,得出主应力以及材料局部坐标方向正应力。同时定义两个起裂判据参数 f_p 和 f_b 为

$$f_p = \{ \langle \sigma_{\max}^t \rangle / \sigma_c^t \}, f_b = \{ \langle \sigma_b^t \rangle / \sigma_{bc}^t \} \quad (6)$$

式中 σ_c^t 为材料允许的临界拉应力, σ_{\max}^t 为材料最大拉应力,即第一主应力,符号 $\langle \rangle$ 表示材料纯压缩时不发生开裂损伤,其值为负时取 0, σ_{bc}^t 为材料层理法向允许的最大拉应力, σ_b^t 为材料层理法向拉应力,压应力时取 0 表示不发生开裂损伤。起裂参数 $f = \max\{f_p, f_b\}$, 当 $f = 1$ 时,开始起裂。

定义两种裂纹演化法则,通过判断生效判据,调用 f_p 和 f_b 各自对应的裂纹演化法则。其中最大主应力起裂判据 f_p 对应裂纹演化采用 Power Law。

$$\frac{G_v}{G_{ec}} = \left\{ \frac{G_I}{G_{IC}} \right\}^{a_m} + \left\{ \frac{G_{II}}{G_{IIC}} \right\}^{a_n} + \left\{ \frac{G_{III}}{G_{IIIC}} \right\}^{a_n} \quad (7)$$

层理面起裂判据 f_b 对应裂纹演化采用 BK 法则^[14],适用于横观各向同性材料, $G_{IIC} = G_{IIIC}$ 。

$$G_{ec} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left[\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right]^\eta \quad (8)$$

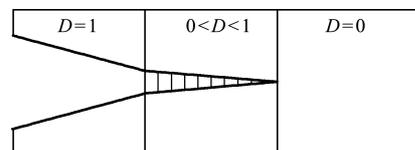


图 2 损伤变量 D 与裂纹状态

Fig. 2 Damage variable D and state of cracks

式中 G_{IC}, G_{IIC} 和 G_{IIIC} 分别为 I 型、II 型和 III 型临界断裂能释放率, G_I, G_{II} 和 G_{III} 分别为 I 型、II 型和 III 型断裂能释放率, a_m, a_n, a_o 和 η 分别为准则材料常数。

2.3 水力压裂中液体的流动

孔隙流在开裂单元中的流动模式如图 3 所示。切向流动满足:

$$v_t = -(k_t/\mu)\nabla p \quad (9)$$

式中 v_t 为裂隙中液体切向流速, k_t 为切向渗透率, μ 为液体动力粘度, ∇p 为沿着裂纹面的压力梯度。

法向流动满足:

$$\begin{cases} v_p = c_p(p_i - p_p) \\ v_b = c_b(p_i - p_b) \end{cases} \quad (10)$$

式中 v_p 和 v_b 分别为裂缝上下面液体渗流速度, p_i 为引入的虚拟节点的孔隙压,代表裂缝内部压力, p_p 和 p_b 分别为裂缝上下面孔隙压, c_p 和 c_b 分别为裂缝上下面的滤失系数。

3 算例分析

3.1 计算条件

考虑井深 1500 m 储层,原地应力场状态为 $\sigma_v > \sigma_{hmax} > \sigma_{hmin}$, 此时由于垂直地应力最大,主要产生垂直裂纹,研究垂直裂纹在水平面的扩展方向与横观各向同性材料参数关系,可将模型简化为平面问题。为观察近井区域的裂纹扩展规律,模型尺寸为 20 m × 20 m,中心处井筒直径 $d=0.15$ m,如图 4 所示。地层滤失系数 $c = 6e-14$ m/(Pa · s),流体粘度 $\mu = 2.5$ cP,泵排量为 0.36 m³/min。

基于扩展有限元和 ABAQUS 子程序开发功能进行各向同性岩体不同应力组合工况和横观各

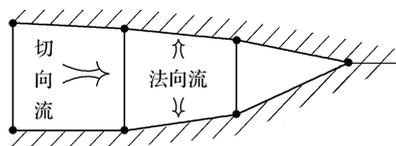


图 3 开裂单元中孔隙流流动模式

Fig. 3 Flow pattern of fluid in fractured element

向同性岩体不同应力组合、不同层理方向以及不同层理面抗拉强度等工况的水力压裂数值模拟分析。

3.2 各向同性岩体计算分析

通过各向同性岩体水力压裂数值计算结果和解析解以及现场典型压力曲线的吻合程度验证模型的有效性,研究不同载荷工况下各向同性岩体水力压裂裂纹扩展规律。材料杨氏模量 $E = 12$ GPa,剪切模量 $G = 5$ GPa,泊松比 $\nu = 0.2$,最大抗拉强度 $\sigma_c^t = 6$ MPa。

各向同性岩体垂直井井壁周围环向应力:

$$\sigma_\theta = -P_f - [(\sigma_{hmax} + \sigma_{hmin})/2](1 + R^2/r^2) + [(\sigma_{hmax} - \sigma_{hmin})/2](1 + 3R^4/r^4)\cos 2\theta \quad (11)$$

式中 σ_θ 为环向应力, P_f 为注水压力, σ_{hmax} 和 σ_{hmin} 分别为水平最大和最小地应力, R 为井眼半径, r 为极坐标半径, θ 为极坐标角。

由水平起裂条件 $\sigma_\theta = -S_t$ 可得,当 $\theta = 0^\circ$ 或 180° 时, σ_θ 最大,即裂缝垂直于最小水平地应力开裂。起裂压力为

$$P_f = 3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} + S_t \quad (12)$$

式中 S_t 为地层抗拉强度。

计算各向同性岩体不同地应力工况列入表 1,变形结果放大 20 倍,裂纹扩展方向如图 5 所示。

表 1 各向同性载荷工况

Tab. 1 Loading conditions of isotropy

工况编号	σ_x /MPa	σ_y /MPa
1	10	3
2	10	6
3	10	10
4	10	14
5	10	20

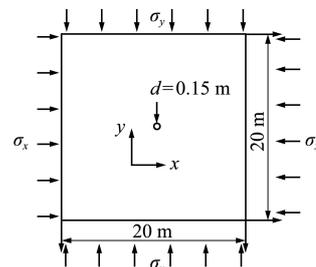


图 4 水力压裂模型

Fig. 4 Model of hydraulic fracturing

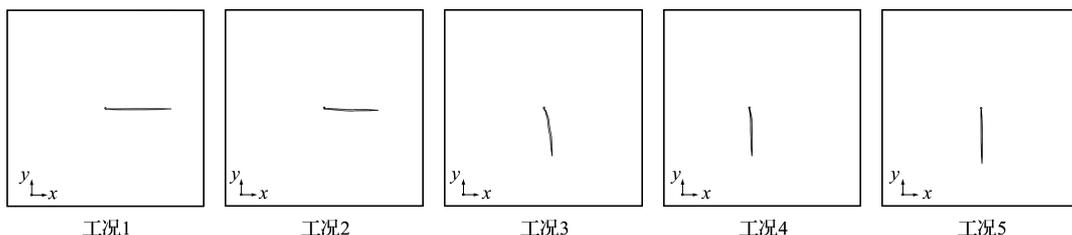


图 5 各向同性岩体不同应力组合作用下水力压裂裂纹的扩展

Fig. 5 Cracks extension of isotropy with different load

从图5可以看出,对于各向同性岩体,(1)当 x 方向地应力大于 y 方向地应力时,裂纹最终垂直 y 轴方向扩展。(2)当 x 方向地应力小于 y 方向地应力时,裂纹最终垂直 x 轴方向扩展。(3)当 x 方向地应力等于 y 方向地应力时,裂纹扩展方向主要由预制裂纹方向决定。由此可知各向同性岩体的裂纹扩展方向主要由地应力状态决定,即沿垂直最小水平地应力的方向扩展。模拟所得裂纹扩展方向与式(12)所得结果相符。各向同性岩体水力压裂过程注水压力随时间变化曲线与现场水力压裂试验的典型压力曲线^[15]一致,如图6所示。数值计算中注水点直接施加在井壁的预制裂纹处,因而无需预先注满井筒,故注水压力曲线初始比现场典型压力曲线上略快。

3.3 横观各向同性岩体计算分析

材料参数 $E_p = 12 \text{ GPa}$, $E_t = 9 \text{ GPa}$, $G_p = 5 \text{ GPa}$, $G_t = 3 \text{ GPa}$, $\nu_p = 0.2$, $\nu_{pt} = 0.4$, $\nu_{tp} = 0.3$, 岩体最大抗拉强度 $\sigma_c^t = 6 \text{ MPa}$,其他参数及载荷工况列入表2。材料方向用两个相互垂直的局部坐标轴表示,以层理法向(即1轴)与 x 轴方向一致时为 0° ,逆时针为正。

计算横观各向同性岩体不同地应力工况,裂纹扩展方向如图7所示。其中层理法向与 x 轴正向

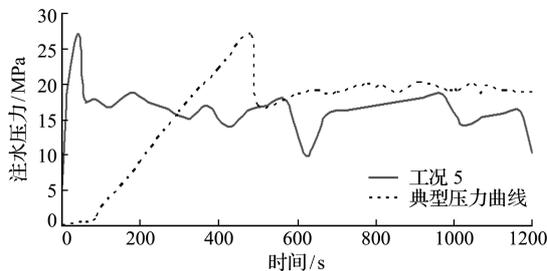


图6 注水压力变化曲线对比
Fig.6 Comparison of water injection pressure curves

夹角为 45° ,岩体抗拉强度为 6 MPa ,层理抗拉强度为 0.5 MPa 。可以看出,当 $\sigma_{hmax} - \sigma_{hmin} > 7 \text{ MPa}$ 时,裂纹沿垂直最小地应力方向扩展;当 $\sigma_{hmax} - \sigma_{hmin} \leq 4 \text{ MPa}$ 时,裂纹沿层理方向扩展。由此可知,对于横观各向同性岩体,裂纹扩展方向受地应力状态和层理方向共同影响。当应力差较大时,裂纹沿垂直最小地应力方向扩展;当应力差较小时,裂纹扩展方向由层理方向主导。

横观各向同性岩体不同层理方向裂纹扩展方向如图8所示,图中箭头方向代表材料的两个方向, $\sigma_x = 10 \text{ MPa}$, $\sigma_y = 20 \text{ MPa}$,岩体抗拉强度为 6 MPa ,层理抗拉强度为 0.5 MPa 。可以看出,层理法向与 x 轴正向夹角 $\leq 30^\circ$ 时,裂纹沿层理方向扩展;层理法向与 x 轴正向夹角 $\geq 45^\circ$ 时,裂纹沿垂直最小地应力方向扩展。由此可知,当地应力状态一定时,层理方向与最小地应力方向夹角较小时,裂纹沿层理方向扩展;当层理方向与最小地应力方向夹角较大时,裂纹沿垂直最小地应力方向扩展。

表2 横观各向同性压裂工况

Tab.2 Loading conditions of transverse isotropy

编号	层理面抗拉强度 σ_{hc}^t /MPa	σ_x /MPa	σ_y /MPa	材料方向 /($^\circ$)
6	0.5	10	3	45
7	0.5	10	6	45
8	0.5	10	10	45
9	0.5	10	14	45
10	0.5	10	20	45
11	0.5	10	20	15
12	0.5	10	20	30
13	0.5	10	20	60
14	0.5	10	20	75
15	0.05	10	3	45
16	0.1	10	3	45
17	0.5	10	3	45
18	1	10	3	45

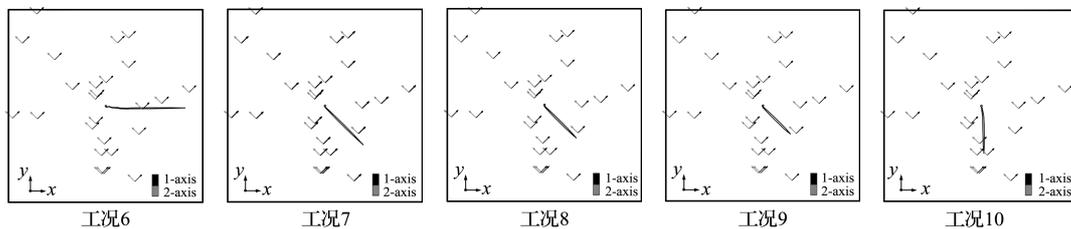


图7 横观各向同性材料不同应力组合作用下水力压裂裂纹的扩展
Fig.7 Cracks extension of transverse isotropy with different load

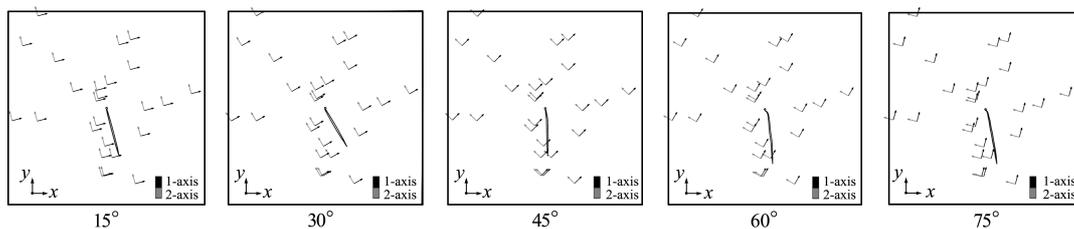


图8 不同层理方向下裂纹的扩展
Fig.8 Cracks extension with different interface orientation

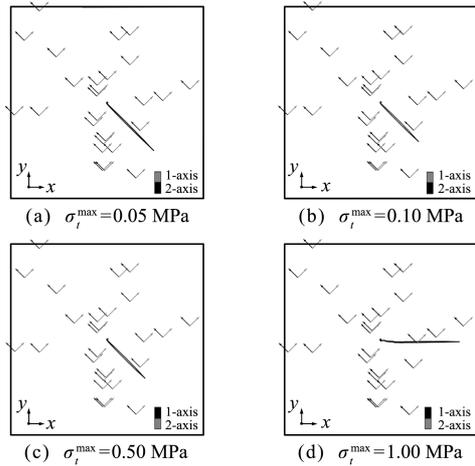


图9 不同层理抗拉强度时裂纹的扩展

Fig. 9 Cracks extension with different bedding tensile strength

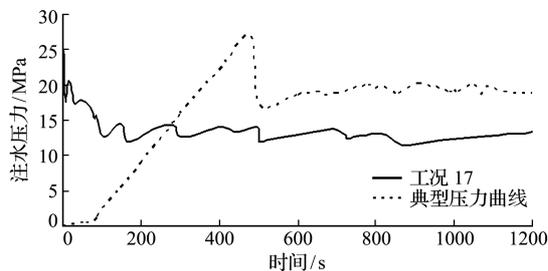


图11 注水压力变化曲线对比

Fig. 11 Comparison of water injection pressure curves

横观各向同性岩体不同层理抗拉强度工况裂纹扩展方向如图9所示,图中层理法向与x轴正向夹角为45°,σ_x=10 MPa,σ_y=3 MPa,岩体抗拉强度为6 MPa。可以看出,当层理抗拉强度σ_t^{max} ≤ 0.5 MPa时,裂纹沿层理方向扩展;当层理抗拉强度σ_t^{max} ≥ 1 MPa时,裂纹沿垂直最小地应力方向扩展。可知层理的抗拉强度同样影响裂纹的扩展方向。此外,当岩体应力状态、层理方向和裂纹扩展方向均相同时,选择图9中4个工况进行分析,如图10所示,裂纹扩展速度随层理抗拉强度的增加而降低。

横观各向同性岩体水力压裂过程注水压力随时间变化曲线与现场水力压裂试验的典型压力曲线^[15]一致,对比如图11所示。随着液体的注入,裂纹的长度和宽度变大,由于地层滤失,裂纹增长速度逐渐减小,如图12所示。

4 结论

本文基于扩展有限元,通过ABAQUS开发子程序定义了岩体的起裂判据和裂纹演化法则,考虑了岩体和裂纹内液体的流动及滤失等因素,建立了水力压裂力学模型。在各向同性岩体水力压裂数值模拟结果和解析解以及现场压裂典型曲线互相吻合的基础上,计算分析横观各向同性岩体不同地

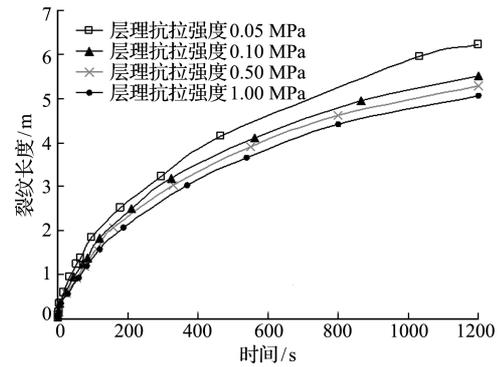


图10 不同层理抗拉强度裂纹长度变化曲线

Fig. 10 Curves of crack length with different bedding tensile strength

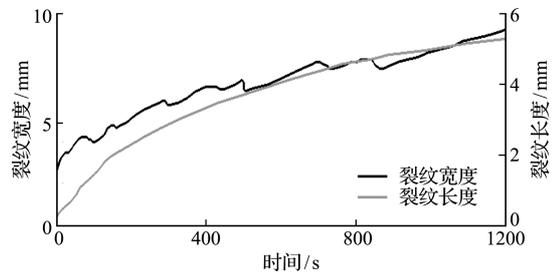


图12 工况17的裂纹尺寸变化曲线

Fig. 12 Curves of crack dimension in case 17

应力状态、不同层理方向和不同层理抗拉强度下水力压裂的裂纹扩展规律,结论如下。(1)横观各向同性岩体,如层状页岩,岩体层理方向对其水力压裂裂纹的扩展有显著影响,其水力压裂裂缝的扩展方向由地应力状态、层理方向以及层理界面抗拉强度共同决定。(2)层理类岩体水力压裂时,原地应力作用下,注水压力在裂纹尖端产生应力集中,该应力在层理面法向的分量先达到界面抗拉强度时,裂纹沿层理面开裂,反之裂纹沿垂直最小地应力的方向扩展。(3)当岩体应力状态、层理方向和裂纹扩展方向均相同时,裂纹扩展速度随层理抗拉强度的增加而降低。(4)由于地层滤失,随压裂液的注入,裂纹长宽尺度增长速率变缓。

参考文献(References):

[1] Alfano M, Furgiele F, Leonardi A, et al. Mode I fracture of adhesive joints using tailored cohesive zone models[J]. *International Journal of Fracture*, 2009, **157**(1): 193-204.

[2] Wangen M. Finite element modeling of hydraulic fracturing on a reservoir scale in 2D [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, **77**(3): 274-285.

[3] Barbieri E, Petrinic N. Three dimensional crack propagation with distance based discontinuous kernels in mesh free methods [J]. *Computational Mechanics*,

- 2013, **53**(2):325-342.
- [4] Almia S, Dal Masoa G, Toader R. Quasi-static crack growth in hydraulic fracture [J]. *Nonlinear Analysis: Theory Method & Application*, 2014, **109**: 301-318
- [5] 连志龙. 水力压裂扩展的流固耦合数值模拟研究 [D]. 中国科学技术大学, 2007. (LIAN Zhi-long, Simulation Study of Hydraulic Fracturing Propagation Coupling Fluid-Structure [D]. University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese))
- [6] 连志龙, 张 劲, 王秀喜, 等. 水力压裂扩展特性的数值模拟研究 [J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 169-174. (LIAN Zhi-long, ZHANG Jin, WANG Xiu-xi, et al. Simulation study of characteristics of hydraulic fracturing propagation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(1): 169-174. (in Chinese))
- [7] 孙可明, 王 松, 张树翠. 页岩气储层水力压裂裂纹扩展数值模拟 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, **33**(1): 5-10. (SUN Ke-ming, WANG Song, ZHANG Shu-cui, A numerical simulation on rules of crack extension during hydraulic fracturing in shale gas reservoir [J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*, 2014, **33**(1): 5-10. (in Chinese))
- [8] 张洪新, 冯胜利, 修书志. 水力压裂裂缝转向数值模拟研究 [J]. 石油天然气学报, 2009, **31**(2): 123-125, 8. (ZHANG Hong-xin, FENG Sheng-li, XIU Shu-zhi. Numerical simulation of fractural diversion in hydraulic fracturing [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, **31**(2): 123-125, 8. (in Chinese))
- [9] 杜修力, 金 浏, 黄景琦. 基于扩展有限元法的混凝土细观断裂破坏过程模拟 [J]. 计算力学学报, 2012, **29**(6): 940-947. (DU Xiu-li, JIN Liu, HUANG Jing-qi. Simulation of meso-fracture process of concrete using the extend finite element method [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, **29**(6): 940-947. (in Chinese))
- [10] 章 青, 刘 宽, 夏晓舟, 等. 广义扩展有限元法及其在裂纹扩展分析中的应用 [J]. 计算力学学报, 2012, **29**(3): 427-432. (ZHANG Qing, LIU Kuan, XIA Xiao-zhou, et al. Generalized extended finite element method and its application in crack growth analysis [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, **29**(3): 427-432. (in Chinese))
- [11] 王 倩, 王 鹏, 项德贵, 等. 页岩力学参数各向异性研究 [J]. 天然气工业, 2012, **32**(12): 62-65. (WANG Qian, WANG Peng, XIANG De-gui, et al. Anisotropic of mechanical parameters of shale [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, **32**(12): 62-65. (in Chinese))
- [12] 贾长贵, 陈军海, 郭印同, 等. 层状页岩力学特性及其破坏模式研究 [J]. 岩土力学, 2013, **34**(s2): 57-61. (JIA Chang-gui, CHEN Jun-hai, GUO Yin-tong, et al. Research on mechanical behaviors and failure modes of layer shale [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(s2), 57-61. (in Chinese))
- [13] 郭印同, 杨春和, 贾长贵, 等. 页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 52-59. (GUO Yin-tong, YANG Chun-he, JIA Chang-gui, et al. Research on hydraulic fracturing physical simulation of shale and fracture characterization methods [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, **33**(1): 52-59. (in Chinese))
- [14] Benzeggagh M L, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus [J]. *Composites Science and Technology*, 1996, **56**(4): 439-449
- [15] 陈 勉, 金 衍, 张广清. 石油工程岩石力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. (CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guang-qing. *Petroleum Engineering Rock Mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))

Study on the law of transverse isotropic reservoir crack extension during hydraulic fracture

SUN Ke-ming*, ZHANG Shu-cui, LI Tian-shu

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: With the difference between transverse isotropic and isotropic reservoir during hydraulic fracture, mechanical model was established based on the extended finite element method. Crack criterions were developed by subroutine in ABAQUS. The law of transverse isotropic reservoir crack propagation was studied on the base of which numerical simulation results coincided well with analytical solution results and the field measured curve with isotropic material. It had drawn some conclusions. The crack propagation direction is codetermined by in-situ stress, bedding direction, rock and interface tensile strength. Injection pressure produces stress concentration at the crack tip during hydraulic fracturing. Crack extends along the bedding when the stress component normal to interface reaches the interface tensile strength first whereas crack extend vertical to minimum in-situ stress. Crack propagation rate decreased with increasing of bedding tensile strength. With fracturing fluid injection, the crack length and width growth decrease due to the leak-off of formation.

Key words: hydraulic fracturing; crack criterion; crack extension; XFEM; transverse isotropic