

·油气钻采工程·

## 砂砾岩水力裂缝延伸路径模拟研究

罗攀<sup>1</sup>,李勇明<sup>1</sup>,江有适<sup>1</sup>,李源<sup>2</sup>

(1.西南石油大学 油气藏地质与开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;

2.西南石油大学 应用技术学院,四川 成都 610500)

**摘要:**通过研究砾石尺度下水力裂缝的不规则延伸和压力波动的原因,优化砂砾岩储层的压裂设计及施工参数。将砂砾岩简化为由砾石、基质和界面3部分组成的复合介质,各部分具有不同的断裂韧性,并由断裂韧性得到判断裂缝延伸与停止延伸的指标——临界能量释放率。通过断裂力学理论与坐标变换,得到裂缝前沿处沿不同角度延伸的虚拟裂缝的应力强度因子和与之对应的能量释放率,裂缝延伸的优先方向即为最大能量释放率对应的方向,沿不同方向延伸的临界破裂压力可由能量释放率得到。通过编程模拟研究了包含不同粒径、含量和断裂韧性砾石的砂砾岩裂缝延伸规律与压力波动特点。模拟结果显示,砾石粒径、含量以及不同部分间断裂韧性的差异是导致砂砾岩裂缝不规则延伸或分叉及诱发施工压力波动的重要因素。

**关键词:**砂砾岩 不规则裂缝 裂缝延伸 压力波动 能量释放率

**中图分类号:**TE357.13

**文献标识码:**A

**文章编号:**1009-9603(2013)05-0103-04

砂砾岩油藏在中国分布较为广泛<sup>[1-7]</sup>,其中大部分物性很差,自然产能较低,压裂是使其具有经济开发价值的重要手段<sup>[8-10]</sup>。准确预测裂缝形态和施工压力是确保压裂施工顺利的重要保证,但中国关于砂砾岩裂缝延伸的研究偏少。

赵益忠等利用巨砾岩心进行了裂缝扩展实验,其结果显示裂缝延伸方向基本沿最大主应力方向,易形成不规则裂缝或多裂缝,破裂压力较高<sup>[11]</sup>;孟庆民等利用真三轴模拟压裂实验系统,对混凝土块进行压裂实验,以模拟砂砾岩的裂缝形态<sup>[12]</sup>,通过对比不同砾石粒径下的裂缝形态与施工压力曲线,发现施工压力波动较明显,且砾石粒径对压力波动存在影响,但这些研究均止步于现象而缺乏对机理的探索。王昊针对砂砾岩的裂缝延伸问题进行了实验和数值模拟研究<sup>[13]</sup>,虽考虑了不同砾石含量、粒径和强度等多种条件,却忽略了砾石与基质界面的影响,而实际情况中界面对裂缝的形态具有重要影响。为此,笔者基于断裂力学理论,建立了判断裂缝延伸方向的简化模型,提出了裂缝延伸的判别指标,以期通过较简便的方式研究砂砾岩裂缝延伸规律,提高对砂砾岩压裂的认识,方便压裂设计,降低压裂施工的风险。

### 1 砂砾岩组成与裂缝延伸规律

组成砂砾岩的材料或组分按其结构特点大体可分为3类:基质,由细小的砂粒组成,具有一定强度;基质中的砾石,强度较高通常不易破裂;基质与裂缝之间的界面,可能是极为薄弱的裂缝,也可能是具有一定强度的胶结面。

分析赵益忠等的研究结果<sup>[11]</sup>可知:当裂缝遇到砾石时,会出现止裂、绕砾、分叉等多种现象,并伴随较明显的压力波动;当砾石粒径较大时,这些现象会更加明显。

由断裂力学理论可知,材料的断裂是因为裂缝的能量释放率超过了临界值,能量释放率与材料受力有关,而临界能量释放率与材料本身性质相关,裂缝总是趋向于能使能量释放率达到最大的方向延伸。在砂砾岩中,高强度砾石较强的断裂韧性可能会使裂缝在特定方向的延伸受到限制,因此裂缝将沿可延伸方向中能量释放率最大的方向延伸。岩石不同部分间断裂韧性差异使裂缝形成扭曲、分叉的不规则形态,同时伴随压力波动,这都给压裂设计和施工带来不便。

收稿日期:2013-07-03。

作者简介:罗攀,男,在读硕士研究生,从事油气开采和增产新技术研究。联系电话:13684075274, E-mail:luopan1989@qq.com。

基金项目:四川省杰出青年学术技术带头人资助计划“页岩气体压裂理论与其应用研究”(2012JQ0010),新世纪优秀人才支持计划“油气藏增产理论与技术”(NCET-11-1062),国家科技重大专项“缝洞型碳酸盐岩油藏高效酸压改造技术”(2011ZX05014-006)。

## 2 裂缝延伸判别指标

为了计算裂缝前沿的能量释放率,判断裂缝前沿的延伸情况,须先计算水力裂缝应力强度因子<sup>[14]</sup>,其表达式为

$$K = \sqrt{\pi L}(p - \sigma_h) \quad (1)$$

式中:  $K$  为水力裂缝应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $L$  为缝长,  $\text{m}$ ;  $p$  为水力裂缝内压力,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_h$  为最小水平主应力,  $\text{MPa}$ 。

根据线弹性断裂力学<sup>[15]</sup>可知,能量释放率与应力强度因子的关系式为

$$G = \frac{K_I^2(1-\gamma^2)}{E} + \frac{K_{II}^2(1-\gamma^2)}{E} \quad (2)$$

式中:  $G$  为能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ ;  $K_I$  为由张力引起的 I 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $\gamma$  为泊松比;  $E$  为杨氏模量,  $\text{MPa}$ ;  $K_{II}$  为由剪切力引起的 II 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

裂缝沿最大水平主应力方向延伸时不存在剪切力,将式(1)代入式(2),可得

$$G = \frac{\pi L(p - \sigma_h)^2(1-\gamma^2)}{E} \quad (3)$$

裂缝发生偏转前沿最大水平主应力方向延伸,当其发生偏转至另一方向时,此刻会有剪切力作用于裂缝壁面上,产生 II 型应力强度因子。同一界面上存在 2 个偏转方向(图 1),对应的偏转角度为互补角,由文献[16]的研究结果可知,裂缝优先沿偏转角度绝对值较小的方向延伸。

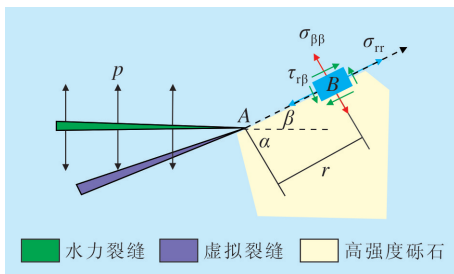


图 1 1 次偏转裂缝及虚拟裂缝尖端应力场  
 $\alpha$  为裂缝偏转角度  $\beta$  的余角,  $(^\circ)$ ;  $\beta$  为裂缝偏转角度,  $(^\circ)$ ;  $\sigma_\tau$  为偏转方向的正应力,  $\text{MPa}$ ;  $\sigma_\beta$  为垂直于偏转方向的正应力,  $\text{MPa}$ ;  $\tau_\beta$  为切应力,  $\text{MPa}$ ;  $r$  为裂缝尖端到裂缝偏转方向上任意点之间的距离,  $\text{m}$

假设有 1 条沿最大水平主应力方向的初始裂缝,其在 A 点遇非均质部分,偏转角度为  $\beta$ ,形成 1 条沿界面的裂缝(图 1)。已知水力裂缝内的压力,  $K_I$  值可由式(1)求得。水力裂缝在界面上距 A 点  $r$  处的 B 点产生的正应力、切应力与  $K_I$  之间的关系式

分别为

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos^3 \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

$$\tau_{\beta\beta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\beta}{2} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

假设存在 1 条沿界面方向的虚拟裂缝,其在 B 点产生的正应力和切应力分别为

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{K_{I(0)}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (6)$$

$$\tau_{\beta\beta} = \frac{K_{II(0)}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (7)$$

式中:  $K_{I(0)}$  为虚拟裂缝的 I 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $K_{II(0)}$  为虚拟裂缝的 II 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

如果令水力裂缝与虚拟裂缝在 B 点产生的应力相同,那么水力裂缝沿  $\beta$  方向延伸的能量释放率就等于虚拟裂缝延伸的能量释放率<sup>[17]</sup>。联立式(4)~式(7),可得虚拟裂缝的 I 型和 II 型应力强度因子分别为

$$K_{I(0)} = K_I \cos^3 \frac{\beta}{2} \quad (8)$$

$$K_{II(0)} = K_I \sin \frac{\beta}{2} \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入(2),可得

$$G_{v1} = \frac{\pi L(p - \sigma_h)^2 \left( \cos^6 \frac{\beta}{2} + \sin^2 \frac{\beta}{2} \cos^4 \frac{\beta}{2} \right) (1-\gamma^2)}{E} \quad (10)$$

式中:  $G_{v1}$  为第 1 次偏转虚拟裂缝的能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ 。

如果裂缝在延伸到 A 点前已发生 1 次角度为  $\beta_1$  的偏转,并即将在 A 点开始第 2 次角度为  $\beta_2$  的偏转(图 2),通过 2 次虚拟裂缝法,求得的第 2 次偏转虚拟裂缝的 I 型和 II 型应力强度因子分别为

$$K_{I(2)} = \cos \frac{\beta_2}{2} \left[ K_{I(1)} \cos^2 \frac{\beta_2}{2} - 3K_{II(1)} \sin \frac{\beta_2}{2} \cos \frac{\beta_2}{2} \right] \quad (11)$$

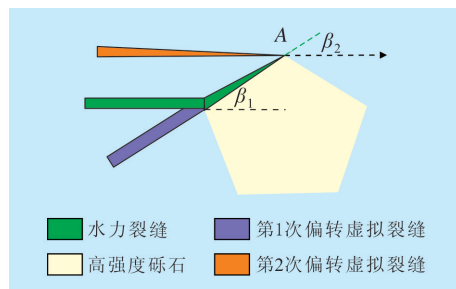


图 2 2 次偏转裂缝及对应的虚拟裂缝

$$K_{II(2)} = \cos \frac{\beta_2}{2} \left[ K_{I(1)} \sin \frac{\beta_2}{2} \cos \frac{\beta_2}{2} + K_{II(1)} \left( \cos^2 \frac{\beta_2}{2} - 2 \sin^2 \frac{\beta_2}{2} \right) \right] \quad (12)$$

式中:  $K_{I(2)}$  为第2次偏转虚拟裂缝的 I 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $\beta_2$  为水力裂缝第2次偏转角

度, ( $^\circ$ );  $K_{II(2)}$  为第2次偏转虚拟裂缝的 II 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

将式(8)和式(9)代入式(11)和式(12), 然后将式(11)和式(12)代入式(2), 可得第2次偏转虚拟裂缝的能量释放率为

$$G_{v2} = \frac{\pi L(p - \sigma_h)^2(1 - \gamma^2)}{E} \times \left\{ \left[ \cos^3 \frac{\beta_1}{2} \cos^3 \frac{\beta_2}{2} - 3 \sin \frac{\beta_1}{2} \cos^2 \frac{\beta_1}{2} \sin \frac{\beta_2}{2} \cos^2 \frac{\beta_2}{2} \right]^2 + \left[ \cos^3 \frac{\beta_1}{2} \sin \frac{\beta_2}{2} \cos^2 \frac{\beta_2}{2} + \sin \frac{\beta_1}{2} \cos^2 \frac{\beta_1}{2} \left( \cos^3 \frac{\beta_2}{2} - 2 \sin^2 \frac{\beta_2}{2} \cos \frac{\beta_2}{2} \right) \right]^2 \right\} \quad (13)$$

式中:  $G_{v2}$  为第2次偏转虚拟裂缝的能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ ;  $\beta_1$  为水力裂缝第1次偏转角度, ( $^\circ$ )。

当  $\beta_1 = 0$  时, 式(13)即变为式(10)。

同理, 可得裂缝第  $n$  次偏转的虚拟裂缝的能量释放率为

$$G_{vn} = \frac{K_{I(n)}^2 + K_{II(n)}^2}{E} (1 - \gamma^2) \quad (14)$$

其中

$$K_{I(n)} = \cos \frac{\beta_n}{2} \left[ K_{I(n-1)} \cos^2 \frac{\beta_n}{2} - 3 K_{II(n-1)} \sin \frac{\beta_n}{2} \cos \frac{\beta_n}{2} \right] \quad (15)$$

$$K_{II(n)} = \cos \frac{\beta_n}{2} \times \left[ K_{I(n-1)} \sin \frac{\beta_n}{2} \cos \frac{\beta_n}{2} + K_{II(n-1)} \left( \cos^2 \frac{\beta_n}{2} - 2 \sin^2 \frac{\beta_n}{2} \right) \right] \quad (16)$$

式中:  $G_{vn}$  为第  $n$  次偏转的虚拟裂缝能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ ;  $n$  为偏转次数;  $K_{I(n)}$  为第  $n$  次偏转虚拟裂缝的 I 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $K_{II(n)}$  为第  $n$  次偏转虚拟裂缝的 II 型应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $\beta_n$  为水力裂缝第  $n$  次偏转角度, ( $^\circ$ )。

### 3 裂缝延伸方向的判定

裂缝延伸方向的判断依据为: 当裂缝遇到非均质介质时, 会向可以延伸的、能量释放率最大的方向延伸; 当裂缝未遇到非均质介质时, 会向能量释放率最大的方向延伸; 当岩石为均质时, 裂缝的能量释放率在最大水平主应力方向达到最大值, 并随着与最大水平主应力方向夹角的增大而减小, 因此裂缝将优先沿偏转角度较小的方向延伸。

裂缝穿过砾石并沿原方向延伸的临界能量释放率为

$$G_{CG} = \frac{K_{ICG}^2(1 - \gamma^2)}{E} \quad (17)$$

式中:  $G_{CG}$  为裂缝穿过砾石并沿原方向延伸的临界能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ ;  $K_{ICG}$  为砾石的断裂韧性,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

沿砾石与基质界面形成裂缝所需要的临界能量释放率为

$$G_{Cl} = \frac{1}{E} (K_{ICl}^2 + K_{IIcl}^2) (1 - \gamma^2) \quad (18)$$

式中:  $G_{Cl}$  为界面裂缝临界能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ ;  $K_{ICl}$  为界面的 I 型断裂韧性,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $K_{IIcl}$  为界面的 II 型断裂韧性,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 其值近似为 I 型断裂韧性的 9/10。

裂缝沿基质延伸所需要的临界能量释放率可表示为

$$G_{CM} = \frac{K_{ICM}^2(1 - \gamma^2)}{E} \quad (19)$$

式中:  $G_{CM}$  为基质临界能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ ;  $K_{ICM}$  为基质的断裂韧性,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

结合以上分析可得, 裂缝遇砾石停止延伸、穿过砾石和沿界面延伸能量释放率应满足的条件分别为

$$\begin{cases} G < G_{CG} \\ G_v < G_{Cl} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} G > G_{CG} \\ G_v < G_{Cl} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} G_v > G_{Cl} \\ G > G_{CG} \\ G_v < G \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} G_v > G_{Cl} \\ G < G_{CG} \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} G_v > G_{Cl} \\ G > G_{CG} \\ G_v > G \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $G_v$  为虚拟裂缝的能量释放率,  $10^6 \text{ J/m}^2$ 。

结合能量释放率及其临界值, 基质破裂和砾石破裂的临界压力可分别表示为

$$p_{CM} = \frac{K_{ICM}}{\sqrt{\pi L}} + \sigma_h \quad (23)$$

$$p_{CG} = \frac{K_{ICG}}{\sqrt{\pi L}} + \sigma_h \quad (24)$$

式中： $p_{CM}$  为基质破裂时的临界压力，MPa； $p_{CG}$  为砾石破裂时的临界压力，MPa。

裂缝沿遇到的第1条界面延伸的临界压力为

$$p_{Cl} = \frac{1.35K_{ICl}}{\sqrt{\pi L \left( \cos^6 \frac{\beta}{2} + \sin^2 \frac{\beta}{2} \cos^4 \frac{\beta}{2} \right)}} + \sigma_h \quad (25)$$

裂缝沿遇到的第2条界面延伸的临界压力为

$$p_{Cl} = \frac{1.35K_{ICl}}{\sqrt{\pi L \left\{ \left( \cos^3 \frac{\beta_1}{2} \cos^3 \frac{\beta_2}{2} - 3 \sin \frac{\beta_1}{2} \cos^2 \frac{\beta_1}{2} \sin \frac{\beta_2}{2} \cos^2 \frac{\beta_2}{2} \right)^2 + \left[ \cos^3 \frac{\beta_1}{2} \sin \frac{\beta_2}{2} \cos^2 \frac{\beta_2}{2} + \sin \frac{\beta_1}{2} \cos^2 \frac{\beta_1}{2} \left( \cos^3 \frac{\beta_2}{2} - 2 \sin^2 \frac{\beta_2}{2} \cos \frac{\beta_2}{2} \right) \right]^2 \right\}} + \sigma_h \quad (26)$$

### 4 裂缝延伸模拟与压力分析

通过编程，模拟了不同粒径、含量和不同断裂韧性砾石等条件下的裂缝延伸与压力波动。为方便编程，所有砾石均为五边形，五边形的外接圆半径在一定范围内随机；界面断裂韧性由随机函数在一定范围内产生。

由模拟结果可见：当砾石粒径较大时，压力波

动周期较长，裂缝的不规则程度也较大(图3a)；当砾石含量较大时，压力波动的频率较快(图3b)；当砾石断裂韧性较小时，可能出现裂缝穿过砾石的现象(图3c)；当界面强度较小时，剪切力的作用可以使界面的破裂压力降至基质的破裂压力以下(图3a)，因而砾石不同部分间断裂韧性差异对裂缝形态、施工压力有较大影响。结果表明，裂缝形态和临界破裂压力均与砾石的粒径、含量及各部分的断裂韧性相关。

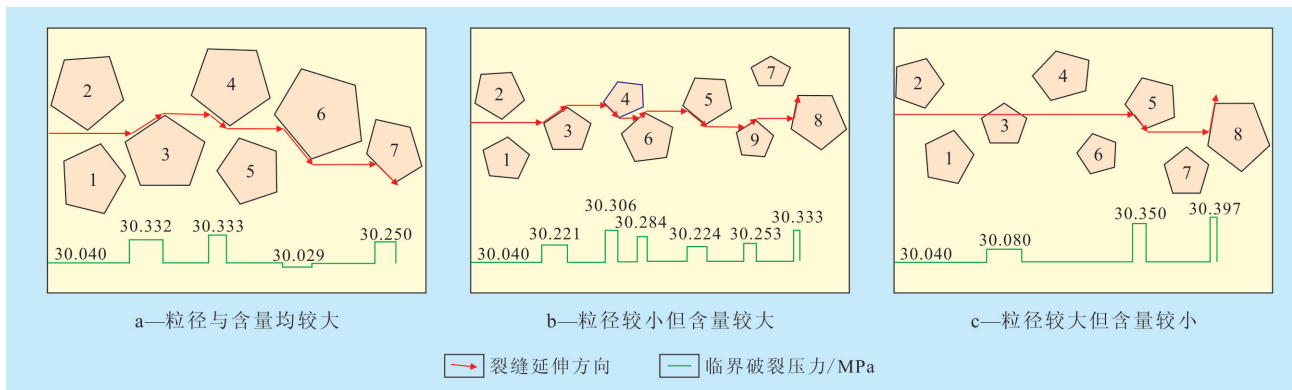


图3 砂砾岩的裂缝延伸方向及其对应的临界破裂压力模拟结果

### 5 结论

砂砾岩裂缝不规则形态和施工压力波动的根本原因在于裂缝延伸组成岩石各部分的断裂性质差异。

当砾石粒径较大时，形成裂缝的不规则程度较大，压力波动周期更长；当砾石密度较大时，压力波动频率更大；当界面断裂韧性较大时，压力波动的幅度增大。

对砂砾岩裂缝不规则延伸的本质进行了研究，提出了砂砾岩裂缝延伸方向判定方法，可模拟多种情形下的裂缝延伸，由于没有涉及到繁琐的数值方法，因此较为简便。

#### 参考文献：

- [1] 邓强,侯加根,唐衍.影响低渗透砂砾岩油藏初期产能的地质因素——以克拉玛依油田五3中区克下组油藏为例[J].油气地质与采收率,2010,17(3):95-98.
- [2] 万欢,黄文辉,王华军.东营凹陷北部陡坡带沙河街组四段砂砾岩成岩作用[J].特种油气藏,2012,19(2):39-42.
- [3] 刘鑫金,宋国奇,刘惠民,等.东营凹陷北部陡坡带砂砾岩油藏类型及序列模式[J].油气地质与采收率,2012,19(5):20-23.
- [4] 武刚.埕东凸起西南坡沙三段砂砾岩体坡积相沉积模式[J].特种油气藏,2012,19(2):22-25.
- [5] 孙晓飞,张艳玉,王中武.裂缝性低渗透砂砾岩油藏一体化评价方法及应用——以盐家油田盐22块为例[J].油气地质与采收率,2011,18(5):70-73.

(下转第110页)