

爆生气体驱动岩石裂缝动态扩展分析

李 宁¹, 陈莉静¹, 张 平²

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 湖南大学岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 爆燃产生的气体压力以脉冲荷载形式随裂缝扩展作用于裂缝表面, 不仅使裂缝壁岩体产生动态响应, 而且爆生气体随裂缝扩展而发生动态变化, 进而对岩体的劈裂过程产生耦合影响, 这一机理的数值仿真分析尚未见报道。模型中用特殊的裂缝单元模拟裂缝张开和闭合, 用 Newmark 法求解反映接触问题的动态有限元方程, 并采用与时间相关的爆生气体压力分布模型, 模拟爆生气体驱动下裂缝扩展过程。分析结果指出: ①爆生气体在压裂过程中起主要作用, 弹性应力波的劈裂作用范围很小; ②地应力值越大起裂越晚, 且裂缝扩展速度越小; ③初始裂缝越长裂缝起裂越早, 裂缝扩展速度也越大; ④钻井中气体升压越快起裂相对时刻越晚, 但对裂缝扩展速度没有明显影响。而裂缝起裂时刻越早以及裂缝扩展速度越快, 可以得到更长的裂缝长度。

关键词: 爆生气体; 裂缝扩展; 动态响应; 油井压裂

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)04-0460-04

作者简介: 李 宁(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要岩体动力学、冻土力学及岩土工程数值仿真分析等方面的教学与研究工作。

Dynamic analysis for fracturing progress by detonation gas

LI Ning¹, CHEN Li-jing¹, ZHANG Ping²

(1. Geotechnical Engineering Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Geotechnical Engineering Institute of Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: When detonation gas pressure acts on crack surface of an oil well, the surrounding rock is subjected to dynamic response, and gas pressure varies with fracturing process, then the fracturing process is influenced by gas pressure variation. Special crack element was used in the proposed model to simulate the opening and closing process of crack. Such a dynamic FEM equation involving contact problem was solved by Newmark method, and the proposed gas distribution function was also considered. The numerical result shows: ①detonation gas had a major role in the fracturing rock comparing with elastic stress wave; ②crack growth velocity was smaller as the initial tectonic stress was greater; ③crack growth velocity was larger as the initial crack length was longer; ④crack initiated relatively later as pressure rose fast, which meant a slowly rising gas pressure would produce a longer crack.

Key words: detonation gas; fracturing progress; dynamic response; oil well crack

0 前 言

复合射孔二次爆燃产生气体, 对油井壁岩石劈裂产生裂缝以增加渗油量的方法, 近年有了较快发展。复合射孔气体压裂过程, 是爆生气体驱动岩石预裂缝扩展问题。针对该问题国内外学者作了许多工作, Nilson 等^[1], Paine 和 Please^[2], 卢文波等^[3]在准静态理论上, 利用解析应力场和相应应力强度因子对气体驱动裂缝扩展进行了分析; 杨小林等^[4]在 Nilson, Paine 工作的基础上引入裂尖损伤局部化; Song 和 Kim (1996)^[5]用离散元模型视缝内气体压力均匀分布, 进行准静态裂缝扩展研究; Cho 等^[6]用动态有限元进行了爆炸过程中多裂缝相互作用研究。然而爆生气体对岩石的劈裂作用涉及到气体在缝内的流动、裂缝尖

端不断向前推进、爆生气体压力动态衰减及岩体的动态响应等多层次耦合问题。针对爆生气体随裂缝扩展的动态变化与对裂缝劈裂过程的数值分析尚未见报道。本文用动态接触界面模型, 对爆生气体压力驱动下岩石裂缝扩展跟踪模拟。以期得到影响压裂效果的敏感性参数, 供油气工程应用或参考。

1 裂缝扩展模型

本文视射孔形成的通道为初始裂缝, 将爆燃产生的气体压力以脉冲荷载形式作用于初始裂缝表面, 并

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479023); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040700001)

收稿日期: 2005-03-28

随裂缝扩展作用在新的裂缝表面上。用能反映动态接触问题的裂缝单元模拟裂缝动态响应与扩展。分析中作以下假定：①地层应力均匀，裂缝沿初始裂缝方向扩展；②气体流动紧跟着裂缝尖端；③裂缝一旦张开，爆生气体压力即刻作用于其表面。

在初始裂缝方向预设裂缝单元见图 1。该单元必须满足在开裂和闭合条件下的附加约束方程：

$$\{[C]^*[R]\}\begin{Bmatrix} u \\ \lambda \end{Bmatrix} = \{f\}^* \quad , \quad (1)$$

式中

$$[C]^* = [-T^*, T^*] \quad , \quad (2)$$

$$\{f\}^* = \begin{Bmatrix} 0 \\ a^* \end{Bmatrix} \quad . \quad (3)$$

如果裂缝闭合，则有位移约束条件：

$$[T]^* = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\{a^*\} = \{0, 0\}^T ;$$

如果裂缝开裂则应有应力约束条件：

$$[T]^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, [R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \{a^*\} = \{P_n, 0\}^T . \quad (5)$$

其中 $\{P_n\}$ 是所考虑的裂缝处爆生气体压力产生的等效结点荷载^[7-8]。

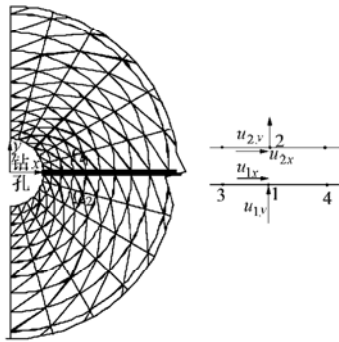


图 1 裂缝单元

Fig.1 Crack element

2 数值求解方法

由虚功原理得到的动态接触方程可表示如下：

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K_s]\{u\} + [K_c]\{w\} = \{P\} \quad . \quad (6)$$

式中 $[M]$ 、 $[D]$ 、 $[K_s]$ 、 $[K_c]$ 分别表示质量矩阵、阻尼矩阵、结构刚度矩阵以及接触刚度矩阵； $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为节点加速度、节点速度以及节点位移矢量； $\{w\}$ 为包含裂缝单元位移和接触力的矢量。为了合并后两项，设

$$[K] = [K_s] + [K_c] \quad , \quad (7)$$

从而式 (6) 可以改写为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [D]\{\dot{u}\} + [K]\{w\} = \{P\} \quad . \quad (8)$$

将裂缝单元的约束项代入式 (8) 得到

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_i \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_i \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & C^{*T} \\ C^* & R \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ \lambda_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i \\ a_i^* \end{Bmatrix} \quad . \quad (9)$$

用 Newmark 法对式 (9) 进行数值求解，其中 P_i 为普通的动力外载， a_i^* 中包含本文特殊的爆生气体压力劈裂荷载 $p(t)$ 。

由于受流动速度的限制及受裂缝表面粗糙度、裂缝周围渗透性等因素的影响，气体在缝内流动过程中沿裂缝向裂缝尖端方向必然存在压力梯度。本文参考 Nilson 等对气体在缝内流动特性的研究成果^[1]，考虑到裂缝内不同位置压力衰减特点暂时用下列表示缝内的压力分布：

$$p(x, t) = p_0(t)(1 - \theta^t) \quad , \quad (10)$$

式中， $p_0(t)$ 是钻孔 t 时刻气体压力， t 的单位为 ms， θ 为相对位置变量， $\theta = (x - r_b)/a$ ，其中 a 为裂缝长度， r_b 为钻孔半径。式 (10) 同样反映了裂缝内气体压力与时间相关的分布特点。

3 裂缝张开判据及分析步骤

分析过程中以裂缝单元的法向应力和张开位移作为裂缝张开和闭合的判别依据。包含裂缝单元位移和接触力的矢量：

$$\{w\} = [u_{1x}, u_{1y}, u_{2x}, u_{2y}, \lambda_1, \lambda_n]^T \quad , \quad (11)$$

式中， u_{1x} 、 u_{1y} 、 u_{2x} 、 u_{2y} 分别表示裂缝单元节点 1、2 的 x 方向和 y 方向的位移， λ_1 、 λ_n 分别表示裂缝单元切向和法向接触力。

裂缝单元法向应力为

$$\sigma_n = \frac{2\lambda_n}{L} \quad , \quad (12)$$

式中， L 为裂缝单元节点 3 和节点 4 之间的距离。当法向拉应力大于抗拉强度时，则裂缝张开。

裂缝张开位移：

$$COD = -u_{1x} \cos \varphi - u_{2x} \sin \varphi + u_{2x} \cos \varphi + u_{2y} \sin \varphi \quad , \quad (13)$$

式中， φ 为裂缝单元法向与 x 轴的夹角。当裂缝张开位移小于临界值（如 1.0×10^{-6} m）时，则裂缝闭合。

分时步进行跟踪仿真模拟，每一时步分析过程如下。

(1) 在现有裂缝表面（搜索张开的裂缝单元）加上该时刻的气体压力，进行位移场和应力场分析。

(2) 用裂缝尖端的预设裂缝单元法向应力和位移判断是否张开，若张开，则进行节点力释放，并修正

刚度矩阵。

(3) 将释放的节点力作为式 (6) 中的荷载项,修正后的刚度矩阵带入其中,(保持加速度和速度与步骤 (1) 求解时一样,)进行求解,求解结果与之前结果叠加。

(4) 重复步骤 (2) (3) 直到没有新的裂缝单元张开。

(5) 进行下个时步分析。

4 算例分析

算例基本资料: 钻井半径 0.07 m, 初始长度为 0.7 m 预存裂缝, 在峰值为 400 MPa, 升压时间 1.32 ms 的爆生气体压力 (曲线形状见图 2) 作用下, 地应力 25 MPa, 岩体弹性模量 9 GPa, 泊松比 0.2, 抗拉强度 6 MPa。

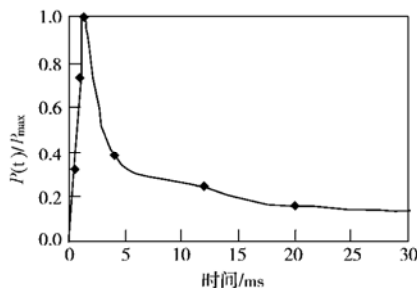


图 2 钻井气体压力曲线形状

Fig.2 Loading mode in borehole

4.1 气体致裂与应力波致裂比较

钻井中气体压力作用下, 在井壁产生的应力波以柱状波方式向周围岩体传播, 而柱状波的波前环向应力按以下方式衰减:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\lambda}{\lambda + 2G} \sqrt{\frac{r_b}{r}} P_b \quad (14)$$

式中, λ 、 G 分别为拉梅常数和剪切模量, r_b 、 r 分别为钻井半径和该点离钻井中心的距离, P_b 为峰值压力。当环向拉应力大于抗拉强度时井壁产生裂缝。

根据以上提到算例资料, 用本文动态裂缝扩展模型得到裂缝最终长度为 1.16 m, 而相同的情况用式 (14) 得到裂缝长度为 0.73 m。应力波作用只作用到预存裂缝尖端的位置, 可见压裂过程中, 裂缝中的气体劈裂起到主要作用。以下分析中以裂缝中爆生气体压力的致裂作用为主进行数值仿真试验。

4.2 不同地应力值对裂缝扩展的影响

Hubbert 和 Willis(1957)提出, 当孔中的流体压力超过最小的切向应力及材料强度时, 裸孔孔壁的裂纹将开始扩展 (启裂)。因而在静岩应力场情况下, 裸孔孔壁的裂纹的启裂条件 (即裂缝闭合压力) 为

$$P_c = k\sigma_d + \sigma_t \quad (15)$$

式中, σ_d 和 σ_t 分别为地应力值和抗拉强度, k 取 1~2, 若在裂纹失稳扩展前流体没有渗入到预存的裂缝中, 则 $k=2$, 若有流体深入则 $k<2.0$ 。

为得到考虑岩体动态响应情况下, 不同地应力值情况下对预存裂纹启裂和扩展的影响, 将不同地应力值条件下得到裂缝启裂和扩展情况进行比较, 见表 1 及图 3。

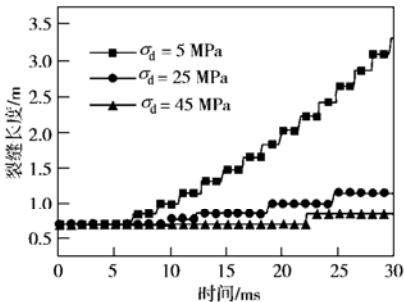


图 3 不同地应力条件下裂缝扩展

Fig.3 Fracturing under different initial stresses

从表 1 数据可以看出, 裂缝启裂均在峰值之后。与式 (15) 相比, 动态分析得出的启裂有滞后性, 即启裂时的气体压力远大于裂缝的闭合压力。且地应力值越大, 滞后越严重, 既气体压力利用率也就越低。

表 1 不同地应力下裂缝扩展情况

Table 1 Results of fracturing under different initial stresses		
地应力值/MPa	启裂相对时刻 t_f/t_0	扩展长度/m
5.0	5.0	3.32
25.0	7.7	1.16
45.0	16.8	0.85

4.3 不同初始裂缝长度对裂缝扩展的影响

为考察初始裂缝长度 (即射孔深度) 对爆生气体致裂效果的影响, 将不同初始裂缝长度下裂缝扩展情况进行比较, 见表 2 及图 4。

表 2 不同初始裂缝长度下裂缝扩展情况

Table 2 Results of fracturing under different initial crack length		
初始裂缝长度/m	启裂相对时刻 t_f/t_0	扩展长度/m
0.2	10.5	0.30
0.4	6.8	0.70
0.7	7.7	1.16
1.0	5.1	2.23

从图 4 及表 2 看出, 初始裂缝较长时对启裂相对时刻和裂缝扩展速度均有影响。

4.4 不同波形的气体压力对裂缝扩展的影响

用有限元数值模拟方法进爆炸荷载作用下岩石动态裂缝扩展研究发现, 高加载率增加钻孔周围的裂缝数目, 而裂缝之间的相互作用抑制了裂缝长度上的扩展^[4]。而本文为了考察荷载波形对裂缝扩展效果的影响, 暂时忽略周围裂缝对主裂缝的影响, 重点探讨不同波形气体压力对单个裂缝扩展的影响。

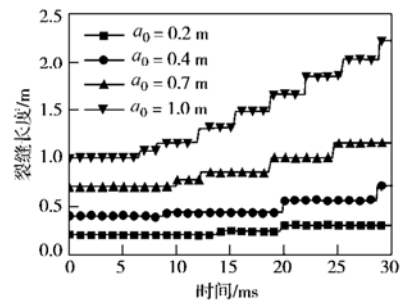


图 4 不同初始裂缝长度下裂缝扩展

Fig. 4 Fracturing under different initial crack lengths

钻井中气体压力采用图 5 中 3 种波形(峰值取 400 MPa), 其他参数同上, 得到裂缝扩展情况见表 3、图 6。从表 3 和图 6 看出, 升压较缓的曲线 1, 启裂相对时间最早, 裂缝扩展速度最快。从单个裂缝扩展来看(暂不考虑不同加载率产生的裂缝形态优劣), 可认为升压较缓的气体压力驱动裂缝扩展的效果较好。

表 3 不同波形气体压力下裂缝扩展情况

Table 3 Results of fracturing under different loading modes			
荷载曲线 编号	荷载峰值时 刻/ms	启裂相对时 刻 t_f / t_0	扩展长度 $l/(m \cdot s^{-1})$
1	1.98	7.3	1.32
2	1.32	7.7	1.16
3	0.66	9.2	1.00

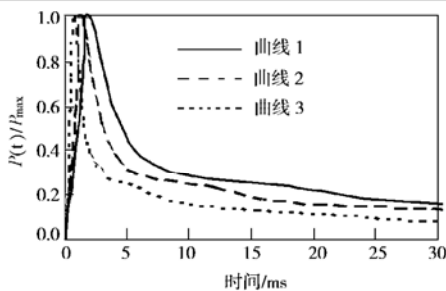


图 5 三种荷载波形

Fig. 5 Three modes of loading

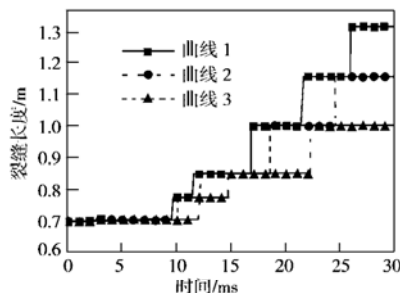


图 6 不同波形荷载作用下裂缝扩展

Fig. 6 Fracturing under different loads

5 结 论

用本文动态接触界面模型模拟气体驱动裂缝扩展得出以下结论: 爆生气体在压裂过程中起主要作用, 在存在初始裂缝的情况下弹性应力波的劈裂作用于其相比相对很小; 裂缝起裂时刻和裂缝扩展速度是

影响压裂效果的决定性因素, 且从三个参数分析中得出以下结论。

(1) 地应力值越大, 起裂时刻滞后越严重, 且裂缝扩展速度越缓, 当地应力成倍增大时, 裂缝扩展速度成倍下降。

(2) 初始裂缝越长裂缝起裂时刻越早, 且裂缝扩展速度越越大, 因而压裂效果越好, 当初始裂缝长度增大一倍时, 则裂缝扩展长度也增大将近一倍。

(3) 升压较缓的气体压力作用下比升压较快的气体压力起裂时刻较早, 因而产生更长的裂缝。

参考文献:

[1] NILSON R H, PROFFER W J, DUFF R E. Modeling of gas-driven fractures induced by propellant combustion within a borehole[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1985, 22(1): 3 - 19.

[2] PAINE A S, PLEASE C. An improved model of fracture propagation by gas during rock blasting—some analytical results[J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr, 1994, 31(6): 699 - 706.

[3] 卢文波,陶振宇.爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究[J].爆炸与冲击,1994,14(3):264 - 268. (LU Wen-bo, TAO Zhen-yu. A study of fracture propagation velocity driven by gases of explosion products[J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(3):264 - 268.)

[4] 杨小林,王梦恕.爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[J].爆炸与冲击,2001,21(2):111 - 116. (YANG Xiao-lin, WANG Meng-shu. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2):111 - 116.)

[5] SONG J, KIM K. Micromechanical modeling of the dynamic fracture process during rock blasting[J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr, 1996, 33(4): 387 - 394.

[6] CHO S H, NAKAMURA Y, KANEKO K. Dynamic fracture process analysis of rock subjected to stress wave and gas pressurization[J]. Paper 2A 20—SINOROCK2004 Symp, Int J Rock Mech Min Sci, 2004, 41(3):1 - 8.

[7] 李 宁, SWOBODA G. 爆破荷载的数值模拟与应用[J]. 岩石力学与工程学报,1994,13(4):357 - 364. (LI Ning, SWOBODA G. A numerical model for blast load and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994,13(4):357 - 364.)

[8] SWOBODA G, LI Ning. Numerical model for blast loading[C]// Proceeding of 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Holland: Balkema Company, 1993: 25 - 33.