

► 钻井与完井 ◀

# 爆生气体作用下孔壁岩石开裂的机理及影响因素研究

林英松<sup>1</sup> 张宝康<sup>1</sup> 蒋金宝<sup>1</sup> 刘兆年<sup>1</sup> 丁雁生<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**开发低渗透油气田最有效的手段是改善低渗透储层物性,但目前常用的水力压裂、酸化和高能气体压裂等措施也各有其不足,因此对岩石具有应力波和爆生气体双重作用的“层内爆炸”方法应运而生。针对爆生气体作用下孔壁岩石的开裂问题,通过分析试验数据,建立了考虑试样惯性的力学模型,并从动力学角度对动态载荷作用下孔壁岩石产生多裂缝的机制做了数值模拟研究。试验及数值模拟结果表明,爆生气体动态载荷作用下孔壁岩石产生多裂缝的实质是试样对动态载荷的结构响应,孔壁岩石能否产生多裂缝主要取决于载荷、约束、结构和材料属性等因素的影响。此外还得到了不同加载速率和初始损伤条件下孔壁岩石开裂的一般规律。

**关键词:**爆炸压裂;裂纹;数值模拟;应力分析

**中图分类号:** TE21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890(2008)03-0050-05

随着石油勘探的日益深入,低渗油田的储量还会增多,怎样来提高该类油田的开发效果是一个迫在眉睫的问题<sup>[1]</sup>。改善低渗透储层物性是开发低渗透油气田最有效的手段。目前低渗透油田的改造措施主要有水力压裂、酸化和高能气体压裂等<sup>[2]</sup>。不过,虽然这些措施对低渗油田的合理开发起到了很大的作用,但仍然存在一些不足,例如对于渗透率很低的油气藏,以水力压裂方法改造后只有主裂缝邻域的油气可以通过岩石中原有微小孔隙流入主裂缝产出,而离主裂缝较远的油气仍难采出。基于以上不足,中科院力学研究所提出利用“层内爆炸”来改造低渗油田<sup>[3-4]</sup>,爆炸载荷可对岩石的作用包括冲击波和爆生气体。笔者在考虑试样材料惯性的基础上,对爆生气体作用下孔壁岩石的开裂机理及影响因素从动力学角度进行了数值模拟分析。

## 1 爆生气体作用下的孔壁岩石开裂

爆炸对岩石的破坏作用包括应力波和爆生气体两部分,目前对应力波的研究已比较深入,但对爆生气体破岩规律和机理的研究比较少<sup>[5-7]</sup>。为了研究爆生气体作用下孔壁岩石的开裂和裂缝扩展情况,丁雁生、谢燮、林英松和付英军等人设计了专门的试验设备,并在严格控制水泥试样力学性质均一性的基础上,做了以中心孔水泥试样代替岩石试样的孔壁开裂试验。试验中不同加载速率的载荷通过控制装药量及相应密封措施而得。试样力学参数:密度

$2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量 3 000 MPa,泊松比 0.3,试样的抗拉强度为 4.69 MPa,断裂韧度为 6.32 MPa·mm<sup>1/2</sup>。几何参数:内半径  $a = 7.5 \text{ mm}$ ,外半径  $b = 75.0 \text{ mm}$ ,厚 70.0 mm。

试验研究表明,爆生气体作用下孔壁岩石的破坏以拉伸破坏为主。在不同的载荷峰值和升压时间条件下,试样内孔所产生的裂缝条数也有所不同。说明爆生气体作用下载荷峰值和升压时间对孔壁岩石的破坏起着非常重要的作用。表1为5块试样分别产生0~5条裂缝时的载荷特征数值。

表1 中期试样试验数据初步处理结果

裂纹数量/条	峰压/MPa	升压时间/ms	升压速率/MPa·ms <sup>-1</sup>
0	30.1	2.65	11.4
2	18.3	1.08	16.9
3	43.2	0.88	49.1
4	63.6	0.47	135.3
5	142.0	0.31	458.1

从表1可以看出,加载速率越快、峰值压力越

收稿日期:2007-12-17;改回日期:2008-02-29

基金项目:中国石油化工股份有限公司科研项目“水力裂缝层内爆炸提高采收率技术基础研究”(编号:P03051)部分研究成果

作者简介:林英松(1964—),女,山东乳山人,1987年毕业于华东石油学院钻井专业,1993年获石油大学硕士学位,2007年获中国科学院力学研究所博士学位,副教授,主要从事岩石力学在石油工程中应用方面的研究工作。

联系电话:(0546)8399080

高,孔壁岩石内壁产生的裂缝将会越多。试样孔壁产生的裂缝大都呈对称分布,笔者的数值模拟计算也是在该试验的基础上进行的,详细试验请参考文献[8]。

## 2 数值模拟

### 2.1 数值模拟力学模型

正确的力学模型是进行数值模拟的重要前提,笔者主要结合试验建立一个简化而又能够解释物理现象的力学模型,通过数值计算方法研究孔壁岩石材料在递增孔压作用下发生多条裂缝的机制,计算分析影响裂缝产生数量的主要因素。力学模型主要从以下几个方面考虑:

1) 试验所用试样尺度较小,激波传播的时间量级为 0.02 ms,远小于载荷上升时间 1~2 ms,所以计算时可以忽略冲击波对试样开裂的影响。

2) 在动态数值计算时考虑了试样惯性对孔壁开裂的影响。

3) 假设岩石为弹脆性介质,当拉应力达到材料抗拉强度时,孔壁即被拉裂;当应力强度因子达到断裂韧性时,裂缝即扩展。忽略水泥试样中其他缺陷的影响,假设只在孔壁上分布着长短不同的若干条径向初始裂缝,以此来模拟试样中所包含的微小缺陷。

4) 结合试验数据,假设当裂缝未贯穿时载荷是线性增加的,贯穿以后将很快衰减,载荷上升段对孔壁岩石开裂有很大影响,所以数值模拟加载时,只考虑上升段载荷对孔壁岩石的破坏作用。

5) 试样的约束对计算结果有明显的影响。结合爆生气体破岩具体试验,假设试样只在外边缘很小范围受到约束。

结合以上假设和具体试验,可以将柱孔冲击开裂考虑成孔壁有初始裂纹的弹性厚壁筒平面应变的动力学问题。笔者使用 ANSYS 有限元软件,将试样的惯性考虑在内,对柱孔开裂试验做了相关的动态数值模拟研究。因为四边形单元具有足够的精度,又有单元数目少的特点,所以在计算时采用了 PLANE42 单元进行求解。计算采用的材料参数同前述孔壁岩石开裂试验中试样的参数。

### 2.2 数值模拟的几何模型和基本方程

1) 几何模型 由于是弹性厚壁筒平面应变问题,所以在数值计算时使用的是二维模型。试样内

半径为 7.5 mm、外半径为 75.0 mm。

2) 边界条件 内边界作用随时间变化的压力为  $p(t)$ ,即  $r|_{r=a} = -p(t)$ ;外边界为自由边界,即  $r|_{r=b} = 0$ ;此外,根据格利菲斯理论可知,在裂缝开始扩展后,新生的裂缝需要表面能项,而线弹性模型没有这一项。数值计算中假设在扩展过程中单位长度裂缝的能量损耗为常量,而在垂直于裂缝面方向上的位移从裂尖到裂口的分布近似为线性,所以,可以在裂缝面上施加一从裂口到裂尖线性分布的周向阻尼,这个线性阻尼所做功近似为裂缝扩展引起的能耗,即  $t|_{a} r c_i+a = f(r)$ 。

3) 破坏判据  $= \frac{d}{i}$  (试样动态抗拉强度),  $K_{Ic} = K_{Ic}$  (试样断裂韧性)。即当孔壁拉应力达到材料抗拉强度时,孔壁有新裂缝产生;当初始裂缝尖端的应力强度因子达到断裂韧性时,裂缝开始扩展。

4) 基本方程 由于试样本身含有很多初始损伤,不是完全对称,具体平面应变基本方程可参考文献[8]。与文献[8]中准静态计算所不同的是考虑了试样的惯性,所以不能忽略体积力。即:  $f_r = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ ,

$$f = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, f, f_r \text{ 分别为对应的体积力。}$$

### 2.3 基本方程量纲分析

基本方程量纲分析的目的是从平面应变问题解的角度和影响该问题解的因素出发,对孔壁产生裂缝的机制做定性分析。根据基本方程和边界条件,孔壁产生的裂缝数量函数  $N$  由该平面应变的解  $(, , , \mu)$  来确定,而平面应变的解又受空间、时间、试样材料性质、试样几何参数、初始损伤和试验条件的影 响,所以裂缝数量又是这些影响因素的函数  $f$ 。故可表示为:

$$N(, , , , u) = f(r, , t, p(t), E, \nu, , , d, K_{Ic}, \epsilon, a, b, c_i, \alpha, n, \gamma) \tag{1}$$

式中,力学量只有 3 个独立量纲,即尺度  $L$ 、时间  $T$  和质量  $M$ 。可以选择 3 个量纲独立的自变量为特征量进行无量纲化。从平衡方程看,选择  $E$ 、和  $a$  ( $a$  试样内半径,  $c_i$  裂缝长度,  $\alpha$  裂缝分布角度,  $b$  试样外半径) 为无量纲化的特征量。令  $\bar{r} = \frac{r}{a}$ ,  $\bar{t} = \frac{t}{a \sqrt{E}}$ ,

$$\frac{r}{a} = \bar{r}, \frac{t}{a \sqrt{E}} = \bar{t}.$$

此外,由试验知载荷  $p(t)$  的特征为孔壁压力峰

值  $p_m$  和升压时间  $t$ 。因此,可将上述分析中的载荷特征用  $\frac{p_m}{a} \sqrt{\frac{t}{E}}$  无量纲量代替。这样,将基本方程、破坏判据及其他边界条件无量纲化后可以将方程的解表示为:

$$N\left(\frac{r}{a}, \frac{t}{a \sqrt{E}}, \frac{p_m}{a} \sqrt{\frac{t}{E}}, \frac{t}{a \sqrt{E}}, v, \frac{d}{E}, \frac{K_k}{E \sqrt{a}}, \frac{b}{a}, \frac{c_i}{a}, \frac{c_i}{a}, \frac{r}{E}, \frac{n}{a}, 1\right) \quad (2)$$

由此可见,裂缝数量取决于载荷特征  $\frac{p_m}{a} \sqrt{\frac{t}{E}}$  和  $\frac{t}{a \sqrt{E}}$ , 结构特征  $a, \frac{b}{a}$  和  $\frac{c_i}{a}, c_i$ , 材料性质  $\sqrt{E/}$ ,  $v, \frac{d}{E}$  和  $\frac{K_k}{E \sqrt{a}}, \frac{r}{E}$ , 约束条件  $\frac{n}{a}$  和  $1$  等因素。

裂缝数量  $n$  与空间和时间坐标无关,如果试样材料、尺寸等各项试验条件均不变时,应有:

$$n = f_n\left(\frac{p_m}{a} \sqrt{\frac{t}{E}}, \frac{t}{a \sqrt{E}}, \frac{c_i}{a}, c_i\right) \quad (3)$$

由此可见,对于同一种试样在试验条件不变的情况下,孔壁裂缝数量取决于压力峰值、材料动态抗拉强度和载荷峰值上升时间、材料属性、初始裂缝的长度和分布。

### 3 数值计算结果及分析

#### 3.1 试样的模态分析

由于爆炸载荷作用下的岩石破坏是一个动力学响应问题,所以首先从振动的角度对“为什么在爆生气体作用下孔壁岩石会产生多裂缝”进行模拟研究。模态分析时,假设试样是没有任何损伤的连续介质,模态分析时的基本方程为:

$$K i = \omega_i^2 M i \quad (4)$$

式中,  $K$  为刚度矩阵;  $i$  为第  $i$  阶模态的振型向量;  $\omega_i$  为第  $i$  阶模态的固有频率;  $M$  为质量矩阵。

模态分析得到相关几何模型 1~10 阶振动的固有频率分别为: 0.25、1.30、2.40、3.80、3.90、4.60、5.30、5.50、6.00 和 6.40 kHz。

图 1 所示为不同阶试样固有频率对应的孔壁拉应力。从图 1 可以看到,在不同频率下孔壁的拉应力分布有明显的不同,这种不同主要体现在孔壁拉应力峰值的大小和位置上。对脆性岩石来说,孔壁

拉应力峰值的大小和位置不同是产生多条裂缝的直接原因。也就是说,假如爆生气体载荷能够同时激发试样的多阶频率,当所激发频率对应的孔壁拉应力分布叠加在一起时,就有可能产生多裂缝。当然这只是产生多裂缝的原因之一,还有一个很重要的因素是,爆生气体载荷峰值的大小,假如载荷峰值并不能使试样发生破坏,那么不管激发多少阶试样,固有频率都不会产生多裂缝使试样破坏。只有当载荷峰值和爆生气体所激发的结构响应同时满足一定的条件时,孔壁才会产生多裂缝。中期试样试验数据的频谱分析曲线(图 2)就能印证该结论。

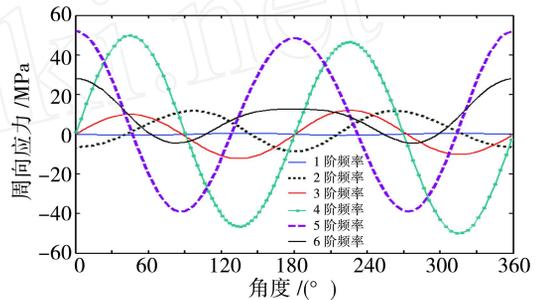


图 1 不同阶试样固有频率对应的孔壁拉应力

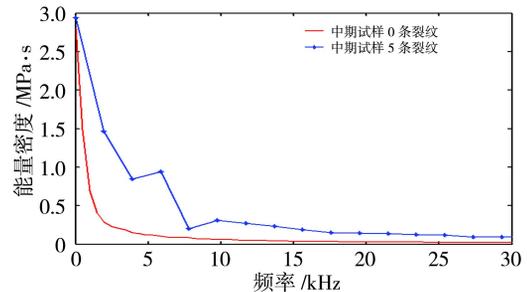


图 2 孔壁产生 0 条和 5 条裂缝时载荷曲线的频谱分析

从图 2 可以看到,当产生的裂缝数量较多时,频谱曲线和坐标系构成的面积要比没有裂缝时构成的面积大,裂缝数量较多时高频部分所占的能量密度要比裂缝较少或没有裂缝时的高。这就使爆生气体载荷不仅能激发试样的多阶固有频率,而且还能有足够的压力使试样破坏。不同频率所拥有的能量叠加在一起导致了孔壁多裂缝的产生。没有裂缝产生或裂缝较少的情况是因为,载荷虽然也能激发这些固有频率,但是载荷的能量强度并没有达到使试样破坏的要求。

由此可见,孔壁岩石产生多裂缝是试样对脉冲爆生气体的一种结构响应,这种响应并没有达到共振的程度。多裂缝的产生取决于脉冲载荷所能激发的固有频率阶数,即加载方式、脉冲载荷的峰值大小及试样的强度、密度、结构和约束等因素。

### 3.2 孔壁岩石裂缝起裂扩展的影响分析

做试验所用的水泥试样并不是一种连续介质,在其内部存在着各种微小的孔隙、裂缝等缺陷,试验中也发现这些微损伤对孔壁岩石的破坏有着重要的影响。由于实际中这些损伤是随机分布的,所以数值计算中微损伤可按 2.1 中 3) (数值模拟力学模型第三点假设) 来描述。根据试验现象,数值计算时的加载速率选择在 10 ~ 200 MPa/ms 之间,从加载开始至到达载荷峰值的时间均为 1 ms。

#### 3.2.1 一条初始裂缝的影响

以孔壁上有一条长 3 mm 的微小裂缝在 0 分布为例进行计算。计算结果表明,当加载速率较低时,随着压力的增大和初始裂缝的扩展在初始裂缝对面的地方产生应力集中,拉应力达到材料的抗拉强度,从而产生一条新裂缝,与静态时的情形很类似<sup>[8]</sup>。而在加载速率较高时,会在初始裂缝对面的区域同时产生两条新裂缝,如图 3 所示,这种现象明显不同于准静态时的情形<sup>[8-9]</sup>。

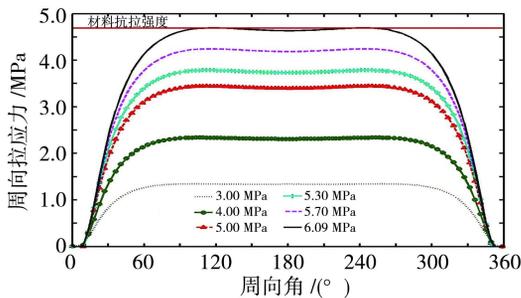


图 3 加载速率为 150 MPa/ms 时的孔壁拉应力分布

此外,随着加载速率的逐渐增大,初始裂缝对面孔壁拉应力达到材料抗拉强度时拉应力峰值夹角随之增大,孔壁开裂压力随着加载速率的增大近似呈线性增加。由此可见,动态载荷加载速率越大,试样惯性对材料破坏的影响越大。

#### 3.2.2 多条初始裂缝的影响

以孔壁上有两条等长 3 mm 的初始裂缝分布和两条不等长的初始裂缝分布为例进行计算。当两裂缝等长且之间的夹角较小(30°)、加载速率低时,孔壁拉应力会在两裂缝对面的区域达到材料的抗拉强度,形成一条新裂缝。加载速率较大时,孔壁拉应力会在两裂缝对面区域的两个地方同时达到试样的抗拉强度,从而同时形成两条新裂缝。但不管在何种加载速率条件下,两裂缝构成的小区域(0°~30°)始终处于受压状态,如图 4 所示。但是,当两初始裂缝

间夹角增大到一定程度后,即使在高加载速率的情况下,也不会出现同时产生两条新裂缝的现象,而是孔壁拉应力首先在两裂缝构成的较大区域内产生一条新裂缝,两裂缝构成的较小区域(0°~60°)也会从受压转变为受拉的状态,如图 5 所示。随着两初始裂缝初始夹角的增大,两初始裂缝的扩展也将变得比较容易,这是因为夹角增大之后,两初始裂缝之间的影响使他们彼此容易在裂尖处达到应力集中,从而容易扩展。

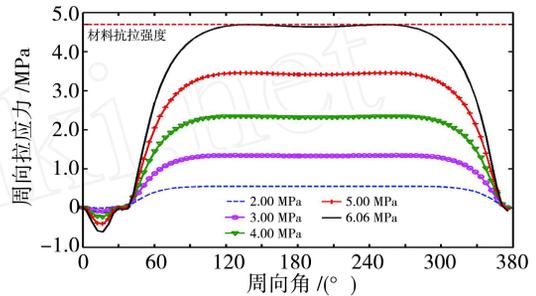


图 4 加载速率为 150 MPa/ms、夹角 30 时的孔壁拉应力

当两条裂缝不等长分布时,长裂缝在 0 的位置,短裂缝分别在 60 的地方,这是由于裂缝的长度不同导致了孔壁拉应力分布的不同。两裂缝夹角比较小时,孔壁拉应力曲线同样会在高加载速率的情况下出现两个峰值的现象,但是不会同时出现产生两条新裂缝的现象,因为初始裂缝的长度不同导致了孔壁拉应力的偏移,孔壁拉应力峰值不能同时达到材料抗拉强度,峰值位置更加接近较长的初始裂缝(如图 5 所示)。当两初始裂缝夹角较大时,拉应力曲线将不会出现双峰的现象,但峰值也向较长的裂缝偏移,多条初始裂缝的长度差别越大该现象越明显。

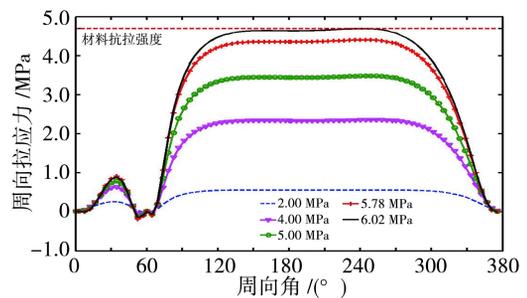


图 5 加载速率为 150 MPa/ms、夹角 60 时的孔壁拉应力

由此可见,初始裂缝的长度、位置对孔壁拉应力分布有明显影响,从而也影响孔壁产生新裂缝的数量和位置。此外,计算还发现,当长短不同的初始裂缝以夹角较小的状态分布时,短裂缝的扩展会受到长裂缝的抑制,因为长裂缝的裂缝张开度比短裂缝的张开度要大,当他们距离较近时,会使短裂缝的扩

展受到抑制。而只有他们以较大的夹角分布时,短裂缝才会首先开始扩展。

三条初始裂缝等长均匀分布时,孔壁拉应力会同时在两两裂缝的中间位置达到材料的抗拉强度,从而产生三条新的裂缝。当三条裂缝不等长均匀分布时,较短的初始裂缝最先开始扩展,而且孔壁拉应力会首先在长初始裂缝对面的区域中产生。四条初始裂缝均匀分布时孔壁拉应力随压力的增大而减小,说明在该情况下,孔壁将不会有新裂缝产生。由此可以判断初始裂缝越多,孔壁上越不容易出现新裂缝,原因是每条初始裂缝在受到爆生气体载荷之后都会扩展并张开,它们彼此的影响区域会产生叠加现象,当初始裂缝较多时这种现象尤为明显,从而导致初始裂缝之间区域的拉应力减小。

### 4 结 论

1) 孔壁岩石试样对爆生气体载荷的结构响应,是导致孔壁岩石产生多裂缝的主要原因。从力学方程无量纲分析来看,产生多裂缝的结构响应不仅取决于加载速率、加载载荷峰值大小,还和材料性质、对试样的约束和试样的结构等因素有关。

2) 与静态数值计算的结果对比发现,材料惯性对孔壁拉应力分布有明显的影响。

3) 多条初始裂缝的分布、初始裂缝的长度影响孔壁拉应力的分布,不仅影响在孔壁产生裂缝的数

量,而且还影响新裂缝出现的位置。

4) 孔壁上新裂缝并不是无止境地出现,当裂缝间的夹角较小时,它们之间的小区域将会处于受压状态,在受压的区域内将不会有孔壁拉伸裂缝的出现。所以,当新裂缝不断增多至一定数量时,将不会再有新裂缝的出现,而只有原有裂缝的扩展,直至贯穿。

### 参 考 文 献

- [1] 林英松,蒋金宝,朱天玉,等.爆炸载荷对水泥试样损伤破坏规律研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(3):55-58.
- [2] 蒋金宝,林英松,孙丰成,等.低渗透油藏改造技术的研究进展[J].钻采工艺,2005,28(5):50-53.
- [3] 丁雁生,陈力,谢燮,等.低渗透油田“层内爆炸”增产技术研究[J].石油勘探与开发,2001,28(2):90-93.
- [4] 李传乐,王安仕,李文魁.国外油气井“层内爆炸”增产技术概述及分析[J].石油钻采工艺,2001,23(5):77-78.
- [5] 杨小林,王梦恕.爆生气体作用下裂纹的扩展机理[J].爆炸与冲击,2001,21(2):111-112.
- [6] 李宁,陈莉静,张平.爆生气体驱动岩石裂缝扩展动态分析[J].岩土工程学报,2006,28(4):460-463.
- [7] 陈莉静,李宁,王俊奇.高能复合射孔爆生气体作用下预存裂缝起裂扩展研究[J].岩土工程学报,2006,28(4):460-463.
- [8] 孙丰成.爆生气体作用下岩石开裂机理数值模拟研究[D].山东东营:中国石油大学(华东)石油工程学院,2005.
- [9] 林英松,孙丰成,丁雁生,等.损伤对爆生气体作用下孔壁岩石开裂规律的影响[J].石油钻探技术,2007,35(4):25-27.

[审稿 葛洪魁]

## Mechanism and Influencing Factors on Radial Fractures' Cracking and Propagation under Exploding Gas

Lin Yingsong<sup>1</sup> Zhang Baokang<sup>1</sup> Jiang Jinbao<sup>1</sup> Liu Zhaonian<sup>1</sup> Ding Yansheng<sup>2</sup>

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100081, China)

**Abstract :** The commonly used effective methods to develop low permeability reservoir, including hydraulic fracturing, acid fracturing and high energy gas fracturing, had disadvantages respectively. Therefore, the exploding-inside-formations stimulation with stress wave and exploding gas appeared. For the problem of radial fractures' cracking and propagation under exploding gas, a mechanics model considering sample's inertia was established based on experiment analysis, fractures under dynamic load was numerically simulated. The results indicate that fractures in a cavity caused by exploding gas was a structural response, Whether or not creating more fractures was determined by load, restraint, structure, and material property and other factors. Furthermore, rules of fractures' cracking and propagation under different loading rate and initial damages were obtained.

**Key words :** explosive fracturing; crack; numerical simulation; stress analysis