

# 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析

卢文波 陶振宇

(武汉水利电力大学 武汉 430072)

**摘要** 分析预裂爆破过程中,对于炮孔堵塞物的轴向一维运动;炮孔空腔的动力膨胀运动;炮孔周边裂纹的动态扩展与爆生气体的渗入;以及炮孔堵塞物可能从孔口冲出后出现的散孔孔口喷流等诸因素,结合炮孔内爆生气体的状态方程,从理论上确定预裂爆破过程中炮孔压力随时间的变化历程,并提出理论计算得到的炮孔压力在工程应用中的修正方法。计算与修正全过程编成程序由电算完成。分析与计算表明,从理论上确定炮孔压力变化历程的方法是可行的。

**关键词** 预裂爆破 炮孔压力 弹性柱面波 气体状态方程

## 1 引言

在铁道、矿山和水利等部门,经常遇到岩石高边坡的钻孔爆破开挖。由于爆炸过程的作用,在形成设计坡面的同时,引起设计坡体的振动,这可能导致边坡的动力失稳,在爆炸作用过程完成后,在坡体的爆破影响区表现为岩石弹性波速及强度的降低,渗透系数增大等,这导致运行过程边坡的稳定性下降。为保证高边坡开挖与运行过程的稳定性,通常采用预裂爆破法,即在高边坡大规模开挖前,先进行预裂爆破。理论和实践都表明,在这种施工方法中,边坡在预裂爆破过程中产生的爆破振动对高边坡稳定性的影响往往是处于控制地位的<sup>[1]</sup>。而要定量分析预裂爆破引起的振动对边坡稳定性的影响,其关键是确定预裂炮孔中压力变化历程曲线。

实测炮孔压力变化历程曲线,由于测试仪器在耐高温、高压等性能的限制而难以实现。近年来有许多学者设法由理论计算并借助于室内外实验手段来确定炮孔压力变化过程。如 F. O. Otuonye<sup>[2]</sup>等通过室内试验、测试,并计算了炮孔堵塞物的运动,从而确定炮孔压力变化历程;P. J. Homment<sup>[3]</sup>等通过计算爆腔的动力膨胀体积来确定炮孔压力;Li Ning<sup>[4]</sup>提出炮孔周边正交裂纹模型,通过计算爆腔和裂纹的体积来确定炮孔压力。所有这些工作,在确定炮孔压力时仅考虑影响炮孔压力诸因素中的某一、二个方面,而要完全从理论上解决炮孔压力还有一定距离。因而,在实际工程应用中,炮孔压力变化历程的选取仍是以半经验、半理论的炮孔压力指数衰减公式为主<sup>[5][6][7]</sup>。所以无论在理论上还是实际应用中,对炮孔尤其预裂爆破炮孔压力变化历程作进一步研究,都具有重要意义。

文中将从影响预裂炮孔压力变化历程的几个主要因素的研究入手,即研究炮孔内装药引爆后炮孔空腔的膨胀运动;堵塞物沿炮孔轴向的一维运动;炮孔周边裂纹的动态扩展

及爆生气体的渗入;以及可能出现的堵塞物从孔口冲出后的敞孔孔口喷流等诸因素,再根据炮孔内气体的状态方程,确定炮孔压力变化历程。

## 2 炮孔空腔的动力膨胀计算

炮孔中装药引爆后,炮孔空腔产生沿径向的膨胀运动。考虑到预裂爆破中一般采用较大的装药不耦合系数,炮孔压力峰值较低,且在爆破开挖完毕后一般可见完好的半孔壁留在设计坡面上,故在预裂爆破过程中,可认为炮孔周围岩石介质中传播的是弹性柱面波。所以可按弹性波理论求解空腔的动力膨胀过程。

弹性柱面波的基本方程组为<sup>[8]</sup>

$$\text{容变律} \quad \sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z = 3K(\varepsilon_r + \varepsilon_\theta) \quad (1)$$

$$\text{畸变律} \quad \sigma_r - \sigma_\theta = 2G(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \quad (2)$$

$$\text{运动方程} \quad \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial t} = \frac{v}{r} \quad (5)$$

$$\text{平面应变条件} \quad \sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (6)$$

上面各式中: $K$ 为体积变形模量; $G$ 为剪切模量; $\rho$ 为岩石密度; $\mu$ 为泊松比; $\sigma$ 、 $\varepsilon$ 分别代表应力和应变;下标 $r$ 、 $\theta$ 、 $z$ 分别代表径向;切向及轴向; $v$ 为径向运动速度。

用特征线法,求解(1)~(6)式,可得上述方程组的特征线方程和相应特征线上的相容条件,且分别表示为

$$dr = 0 \quad (7)$$

$$\{[(1 + \mu)/3K] - 1/2G\}d\sigma_r + \{[(1 + \mu)/3K] + 1/2G\}d\sigma_\theta = (2v/r)dt \quad (8)$$

$$dr = \pm c_i dt \quad (9)$$

$$d\sigma_r = \pm \rho c_i dv - \{[(\sigma_r - \sigma_\theta) \mp (\mu \rho c_i v / (1 - \mu))]/r\}dr \quad (10)$$

上两式中 $c_i$ 为柱面波的纵波速度,其值为

$$c_i = \sqrt{E(1 - \mu)/[\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)]} \quad (11)$$

在知道应力初始条件和应力边界条件的情况下,由(7)~(10)式得到炮孔壁沿径向的运动速度和炮孔周围的应力场。

如果算得任意 $t$ 时刻炮孔壁的径向速度为 $v(t)$ ,则在微段 $dt$ 内,炮孔空腔因径向动力膨胀而产生的体积增量 $\Delta V_b$ 为

$$\Delta V_b = 2\pi r(t)v(t)dt \quad (12)$$

上式中 $r(t)$ 为任意 $t$ 时刻炮孔空腔的半径。在微段 $dt$ 末,炮孔空腔半径近似为

$$r(t + dt) = r(t) + v(t)dt \quad (13)$$

## 3 炮孔堵塞物的轴向一维运动计算

关于炮孔堵塞物的轴向一维运动,已有许多文献<sup>[9][10][11]</sup>对它进行了分析和计算。当炮孔内装药引爆后,在岩体和炮孔堵塞物内同时产生应力波,受它的作用,堵塞物受到压

缩,当应力波到达孔口时,炮孔堵塞物的压缩停止,并产生整体抛掷运动。具体分析炮孔堵塞物的轴向运动规律,其计算简图如示图 1,设炮孔深为  $H$ ,直径为  $D$ ,堵塞物长度  $l$ ,其密度为  $\rho$ ,炮孔内爆生气体的压强为  $p$ ,堵塞物中应力波波速为  $c_p$ 。若应力波由堵塞物底部传至孔口时的总时间为  $t_1$ ,则有

$$t_1 = l/c_p \tag{14}$$

炮孔内装药起爆  $t$  时间后 ( $0 < t \leq t_1$ ),堵塞物在该时间内获得的总冲量为

$$\Delta_1 = \int_0^t p(\tau) \frac{1}{4} \pi D^2 d\tau \tag{15}$$

式中  $p(\tau)$  为炮孔压力变化历程曲线。

堵塞物受到的轴向摩擦力冲量  $\Delta_2$  和轴向重力冲量  $\Delta_3$  分别为

$$\Delta_2 = - \int_0^t [\pi D \tau c_p (1 - \sin \varphi_0) f p(\tau) / (1 + \sin \varphi_0)] d\tau \tag{16}$$

式中:  $\varphi_0$  为堵塞物的内摩擦角;  $f$  为动摩擦系数。

$$\Delta_3 = \frac{1}{4} \pi D^2 L \rho_s g t \tag{17}$$

图 1 炮孔堵塞物的运动

Fig. 1 The movement of the stem

于是根据动量定理有

$$\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = \frac{1}{4} \pi D^2 l c_p \rho_s v(t) \tag{18}$$

式中,  $v(t)$  为堵塞物沿轴向压缩速度。由 (15)~(18) 式得

$$v(t) = \frac{1}{(l c_p \rho_s)} \int_0^t p(\tau) d\tau - \{ 4 f (1 - \sin \varphi_0) / [D \rho_s (1 + \sin \varphi_0)] \} \int_0^t p(\tau) \tau d\tau - g t_1 \tag{19}$$

式中,  $g$  为重力加速度。

则因堵塞物压缩引起的炮孔体积增量为

$$\Gamma_s = \frac{1}{4} \pi D^2 \int_0^t v(\tau) d\tau, \quad (0 \leq t \leq t_1) \tag{20}$$

当堵塞物压缩完毕后,堵塞物获得整体初速度为  $v_0$  从孔口抛射,  $v_0$  可由 (19) 式得到。

$$v_0 = v(t) |_{t=t_1} \tag{21}$$

当炮孔堵塞物从孔口开始作抛射运动后,若堵塞物冲出孔口段长度为  $y$ 。并假设堵塞物冲出孔口后并不飞散,则根据牛顿第二定律得炮孔堵塞物沿孔轴向运动加速度  $a(t)$  为

$$a(t) = p(t) / (l \rho_s) - 4 \{ [l - \int_0^{t_1} v(\tau) d\tau - y(t)] p(t) f (1 - \sin \varphi_0) / [D \rho_s (1 + \sin \varphi_0)] \} - g \tag{22}$$

其中:  $y(t) = v_0 (t - t_1) + \int_{t_1}^t \int_{t_1}^{t_1} a(\tau) \cdot d\tau, \quad (t_1 \leq t \leq t_2);$  (23)

$t_2$  为堵塞物完全冲出炮孔时间。

由 (21)~(23) 式即可得炮孔堵塞物沿孔轴向的抛射运动规律,于是可得因堵塞物沿

炮孔轴向一维抛射运动增加的炮孔空腔体积为

$$V_s = \frac{1}{4} \pi D^2 y(t) \quad (t_1 \leq t \leq t_2) \quad (24)$$

#### 4 炮孔周边裂纹的动态扩展计算

关于炮孔周边裂纹的动态扩展模型,文献[4]中提出孔周正交裂纹模型,文献[12]、[13]中提出平面楔形裂纹模型和平面盘状裂纹模型。我们认为,实际炮孔周边裂纹动态扩展模型的选取应根据炮孔类型(如预裂孔、掏槽孔等),炮孔间的空间布置以及临空面等因素而确定。对于目前所研究的预裂炮孔的周边裂纹发展模型,显然取楔形裂纹模型比较合适,其计算简图如图 2。若炮孔压力为  $p(t)$ ,且爆生气体完全充满楔形裂纹,并假定裂纹尖端的非弹性区与整条裂纹的尺寸相比可忽略,则按线弹性断裂力学理论可得裂纹上任一点的位移张开度为<sup>[12]</sup>

$$w(x) = [4(1 - \mu)/(\pi G)] \int_x^{L_a} \int_0^\xi [(p(\zeta) - \sigma) \div \sqrt{\xi^2 - \zeta^2}] d\zeta \cdot [\xi / \sqrt{\xi^2 - x^2}] \cdot dx \quad (25)$$

式中,  $\sigma$  为炮孔周围岩体的原场应力。

如果近似认为爆生气体压强  $p$  沿裂纹方向无变化,其值为  $p(t)$ ,则积分上式得

$$w(x) = 2(1 - \mu)[p(t) - \sigma] \cdot \sqrt{L_a^2 - x^2}/G \quad (26)$$

则裂纹总体积为

$$V_a = 2H \int_0^{L_a} w(x) dx \quad (27)$$

式中,  $H$  为炮孔深度。

把(26)式代入(27)式可得

$$V_a = \pi(1 - \mu)[p(t) - \sigma]HL_a^2 \quad (28)$$

若裂纹以等速  $c_a$  稳定发展,则

$$L_a = c_a t \quad (0 \leq t \leq t_a) \quad (29)$$

其中:  $t_a = L_b/(2 \cdot c_a)$ ;  $L_b$  为炮孔间距。 (30)

若  $t > t_a$ ,则认为

$$L_a = L_b \quad (31)$$

#### 5 敞口孔爆生气体孔口喷流运动计算

当堵塞物完全从炮孔内抛射后,炮孔成了敞口孔。敞口孔爆生气体孔口喷流属一维非定常连续流动。若忽略爆生气体的粘滞性,则根据气体动力学的有关知识<sup>[14]</sup>,在炮孔出口断面上有

$$v_e = 2c/(1 + \nu) \quad (32)$$

$$p_e = [2/(1 + \nu)]^{2\nu/(\nu-1)} p \quad (33)$$

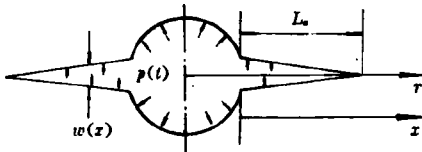


图 2 平面楔形裂纹动态扩展模型

Fig. 2 A planar model with wedge-shaped fractures

式中:  $v_e$ 、 $p_e$  分别为出口断面上气体速度和压强;  $c$  为炮孔内爆生气体的当地音速;  $p$  为爆生; 气体压强;  $\nu$ 、 $\rho$  分别为爆生气体的等熵指数和密度, 且有

$$c = \sqrt{p\nu/\rho} \quad (34)$$

(32)、(33)式的适用条件为算得的出口断面气体压强大于大气压  $p_a$ 。出口断面的气体密度  $\rho_e$  由下式计算

$$\rho_e = (p_e/p)^{1/\nu} \rho \quad (35)$$

则在时间  $dt$  内, 由孔口喷射出去的气体总质量  $\Delta m$  为

$$\Delta m = \frac{1}{4} \pi D^2 v_e \rho_e dt \quad (36)$$

设  $m$  为微段  $dt$  初始时炮孔内气体总质量,  $V_H$  为  $dt$  时段末炮孔总体积, 则在微段  $dt$  末炮孔内残留爆生气体的密度为

$$\rho = (m - \Delta m)/V_H \quad (37)$$

## 6 炮孔内爆生气体压强变化历程计算

忽略爆生气体的粘滞性, 并把爆生气体当作多方气体, 则该气体的状态方程为

$$p = A\rho^\nu, \quad (38)$$

$$\text{或 } pV^\nu = \text{const} \quad (39)$$

上两式中  $A$  为与炸药种类有关的常数,  $p$ 、 $V$ 、 $\rho$  分别为爆生气体的压强、总体积和密度。等熵指数  $\nu$  的取值可参见文献[6], 设  $p_k$  为炸药的临界压力, 则  $p \geq p_k$  时, 取  $\nu = 3.0$ ; 当  $p < p_k$  时, 取  $\nu = 1.4$ 。

显然, 在炮孔堵塞物未完全冲出孔口以前, 选用(39)式较方便, 而对敞孔爆生气体的孔口喷流, 则选用(38)式较适合。

具体计算炮孔压力的变化历程时, 必须采用逐步计算法。若  $i$  阶段的炮孔压力  $p_i$ , 炮孔内爆生气体密度  $\rho_i$ ; 炮孔壁的瞬时径向运动速度  $v_r$ 、瞬时半径  $r_i$ ; 以及堵塞物的轴向运动速度、加速度、裂纹总体积等全已知或由前面各步计算得到; 若时间步长取为  $dt$ , 则可由(12)、(20)、(24)和(28)式算得在  $dt$  时间内所增加的炮孔体积, 则由(39)式可算得在  $dt$  末时炮孔压力值。(若是属于敞孔孔口喷流阶段, 并由(37)和(38)式来算得炮孔压力)。然后再由(7)~(10)式用差分法来算得炮孔壁在  $dt$  时段末的径向运动速度以及炮孔周围岩体中的应力场和速度场。重复前面各步, 即可得炮孔压力随时间变化的全过程以及炮孔周围岩体的应力场和速度场等。

## 7 算例

为了验证文中提出的预裂爆破炮孔压力变化历程理论计算方法的正确性, 现用一个典型的预裂炮孔压力变化历程的分析与计算来验算。

在该典型炮孔中, 取孔深  $H = 5.2\text{m}$ , 直径  $D = 50\text{mm}$ , 孔间距  $L_b = 0.5\text{m}$ , 炮孔内装药为 104-20 型, 炸药爆速为  $3341\text{m/s}$ , 炮孔线装药密度为  $0.31\text{kg/m}$ 。炮孔堵塞长度  $L = 0.5\text{m}$ , 堵塞用砂土, 其特性参数为:  $\varphi_0 = 28^\circ$ ,  $f = 0.055$ ,  $c_r = 550\text{m/s}$ 。炮孔周围岩石介质为砂岩, 其特性参数为:  $c_t = 3214\text{m/s}$ ,  $E_d = 26.7\text{GPa}$ ,  $\mu_d = 0.015$ , 下标  $d$  代表动参数, 水平方向岩体中

原场应力  $\sigma=0.2\text{MPa}$ 。裂纹的动态扩展速度  $c_s=0.38c_l$ 。假设装药在炮孔内瞬时起爆,并达到炮孔初始平均爆压,其值经计算为  $p_0=114\text{MPa}$ 。

用文中②提出的算法,从理论上算得的炮孔压力变化历程曲线为图3中的曲线①;而图中曲线(2)是文献[15]中建议的用半理论半经验的双指数衰减公式算得的炮孔压力变化历程。

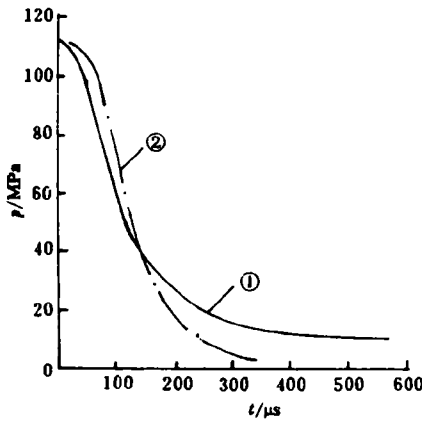


图3 炮孔压力变化历程

Fig. 3 The variations of the borehole pressure

从图3的两条曲线知,由理论上算得的炮孔压力变化曲线与双指数衰减公式算得的炮孔压力变化曲线在装药刚起爆后的一段时间内,其衰减趋势是基本一致的。而在炮孔压力作用的后阶段,理论上算得的炮孔压力能保持一定的压力值(10~20MPa)和一定的时间,这是有效堵塞(即炮孔堵塞)物未被冲出的必然结果,这一点无疑比双指数衰减公式更符合实际。

### 8 实际应用中的修正

应该指出,当把理论上算得的炮孔应力变化历程运用到实际中去时,仍需进行一定的修正,这是由于计算过程作了许多理想的假定,而且计算中特性参数的选取也与实际有一定的差异。这种修正反映在两方面:其一是炮孔峰值压力  $p_0$  的修正;其二是炮孔压力作用总历时的修正。该修正需结合声波测试结果进行,具体做法如下:

在炮孔周围岩石介质中布置一个测点,用声波测试法可测得该炮孔中装药引爆后的振动波形(振速)。设其测得的速度峰值为  $v_m$ ,波形持续总历时为  $T_m$ 。用理论计算确定炮孔压力过程中,由(7)~(10)式可算得该点的振动波形,由于假设炮孔内装药是瞬时爆轰,故当装药起爆后,炮孔周围岩石介质中传播的是一强间断弹性柱面波。在波阵面上质点的速度与炮孔初始压力峰值  $p_0$  间关系为<sup>[8]</sup>

$$v = \sqrt{a/r} \cdot p_0 / (\rho c_l) \tag{40}$$

式中: $a$ 为炮孔半径, $r$ 为测点至孔中心距离。设计算得到测点的理论速度峰值为  $v_c$ ,借助关系式(40),可修正炮孔初始压力峰值为

$$p'_0 = v_m p_0 / v_c \tag{41}$$

考虑到炮孔中装药引爆一定时间后,随着炮孔间贯穿裂纹的形成,爆生气体沿裂纹向大气中渗漏,炮孔压力迅速衰减为零,故需修正炮孔压力作用总历时。在岩石为均质和弹性情况下,炮孔作用历时可取为测点振动波形的持续时间  $T_m$ 。

通过第一次修正后,假设炮孔压力变化历程可表示为

$$p(t) = p'_0 f(t), \quad 0 \leq t \leq T_m \tag{42}$$

则由(7)~(10)式可重新得到在修正后炮孔压力变化历程的情况下测点的振动波形。重复第一次修正的做法,对炮孔压力重新修正,直至满足所需的精度。

## 9 结 论

通过上述理论分析和计算,算例的验算以及理论计算得到的炮孔压力变化历程在实际应用中的修正,可得到如下结论:

(1)在预裂爆破过程中,通过分析炮孔空腔的动力膨胀运动、炮孔堵塞物的轴向一维运动、炮孔连线间预裂缝的动态扩展与爆生气体的渗入,以及炮孔堵塞物可能从孔口冲出后出现的敞孔孔口喷流等诸因素,从理论上计算炮孔压力变化历程这种方法是可行的。

(2)文中,提出的理论计算方法,其计算全过程可编制程序由电算完成,简便而快速。

(3)理论计算得到的炮孔压力变化历程在实际应用中,需结合声波测试结果进行幅值以及炮孔压力作用总历时两方面的修正。

作者是根据预裂孔中装药引爆后与围岩介质间的瞬时作用过程,从理论上确定炮孔压力变化历程的一种尝试。文中提出的计算预裂炮孔压力变化历程的理论方法可供有关方面参考。

## 参 考 文 献

- 1 吴新霞. 爆破高边坡影响及边坡动态稳定分析:(科研报告). 武汉:长江科学院,1990.
- 2 Francis O Otuoroye, et al. Measurements and Predictions of Borehole Pressure Variations in Model Blasting Systems. In: First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, Sweden, 1983. 7~20
- 3 Hommert P J, 等著;谢剑华译. 爆破漏斗堵塞物作用的计算和实验研究. 见:第二届爆破破岩国际会议论文集. 武汉:长江科学院,水利水电爆破咨询服务部,1990. 387~395
- 4 Li Ning, Swoboda G. The Numerical Modelling of Blast Loading, Application of Computer Methods in Rock Mechanics. In: Proceedings of International Symposium ACMIRME. Xia' n China; [s. n], 1993. 547~552
- 5 Swoboda G, Zenz. G. Practical Considerations of Blasting Loading Using Numerical Modelling. In: Proceeding of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck, 1988, 1681~1688
- 6 J. 亨利奇著;熊建国,等译. 爆炸动力学及其应用. 北京:科学出版社,1987. 71~72, 305~306
- 7 高金臣. 爆破荷载在岩体中引起应力波的传播理论与实验研究:[博士论文]. 北京:中国矿业大学,1987. 40~41
- 8 王礼立编著. 应力波基础. 北京:国防工业出版社,1985. 196~201
- 9 杨人光,史家培著. 建筑物爆破拆除. 北京:中国建筑工业出版社,1985. 173~175
- 10 张 奇. 光面爆破炮孔堵塞长度及作用. 长沙矿山研究院(季刊),1989,9(3):38~43
- 11 李守巨,等. 关于炮泥运动规律的研究. 长沙矿山研究院(季刊),1990,10(4):1~5
- 12 Nilson. R H. Gas-Driven Fracture Propagation. J A M, 1981, 48: 757~762
- 13 Nilson R H, et al. Modelling of Gas-Driven Fractures Induced by Propellant Combustion Within a Borehole. In: Int J Rock Mech Min Sci & Geomech. Abstract, 1985, 22(1):3~19
- 14 张连玉,汪令羽,苗瑞生编著. 爆炸气体动力学基础. 北京:北京工业学院出版社,1987. 244~245
- 15 朱瑞庚,王雪峰. 不耦合装药爆破孔壁压力的计算(一),爆破,1990,3:1~4

## THEORITICAL ANALYSIS OF THE PRESSURE-VARIATION IN BOREHOLE FOR PRE-SPLITTING EXPLOSION

Lu Wenbo, Tao Zhenyu

(*Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering, Wuhan, 430072*)

**ABSTRACT** In this paper a theoretical method to calculate the pressure variation in the borehole for pre-splitting explosion. In accordance with the equation of state of gases, the one-dimension movement of the stem, is presented dynamic fracture propagation between boreholes, the development of fracture volume and the outburst of explosive-produced gases after the burst of stem, etc are also given. The calculated result is modified both in amplitude and pressure durative time in borehole according to the result of sonic measurement.

**KEY WORDS** pre-splitting explosion, borehole pressure, elastic cylindrical wave, gas equation of state