

爆炸冲击波的动态破岩特性研究^{*}

宗 琦

(淮南矿业学院 安徽淮南 232001)

摘要 运用爆炸冲击波理论,讨论了炮孔柱状装药爆破时的岩石粉碎区及其形成时间、爆腔半径及其扩张规律。通过分析表明:影响粉碎区半径和爆腔半径的主要因素是冲击波的强度、岩石的性质和炮孔尺寸等。

关键词 冲击波 粉碎区 爆腔

中图法分类号 TD 235 1

1 前 言

岩石中装药爆破时,在爆炸冲击载荷作用下,岩石的破坏是一个相当复杂的动力学过程。爆轰波和高温高压的爆生气体产物撞击孔壁在炮孔周围岩石中激起径向传播的爆炸冲击波。因其具有相当强的冲量和相当高的能量,且峰值压力远高于岩石的动态抗压强度,故受其冲击压缩作用,岩石极度粉碎而形成炮孔周围的粉碎区;同时孔壁岩石质点发生径向外移,爆腔扩大。冲击波传播过程中衰减很快,作用范围不大,但对岩石的破坏程度却非常强烈,消耗的爆炸能比例也相当高。因此研究爆炸冲击波作用下岩石的变形和破坏有着重要意义,它是进行爆炸能量分析和工程爆破参数设计的依据。基于此,我们根据炮孔耦合柱状装药爆破时炮孔近区的爆炸冲击波的力学模型,讨论冲击波的动态破岩特征。

2 粉碎区半径

装药爆轰后,炮孔周围岩石中的冲击波在传播过程中,波阵面上的状态参数满足据质量守恒、动量守恒和能量守恒建立起来的基本方程

$$d_m D = d(D - u) \quad (1)$$

$$p = d_m D u \quad (2)$$

$$\Delta E = \frac{p}{2} \left(\frac{1}{d_m} - \frac{1}{d} \right) \quad (3)$$

式中: p 为冲击波波阵面上的峰值压力, D 为冲击波的波速, u 为冲击波波阵面上岩石质点的移动速度, d 为冲击波波阵面上的岩石密度, d_m 为岩石的原始密度, ΔE 为单位质量岩石的内能增量。

岩石中冲击波的传播速度和由其引起的岩石质点移动速度间存在如下关系^[1]

$$D = a + bu \quad (4)$$

* 1996-09-06收到原稿, 1996-10-28收到修改稿。

式中: a b 是由试验确定的与岩石性质有关的常数。表 1 即为部分岩石的 a b 值。

表 1 某些岩石的 a b 值

Table 1 Parameters of some rock

岩石名称	$d_m /$ (kg/m^3)	$a /$ (m/s)	b	岩石名称	$d_m /$ (kg/m^3)	$a /$ (m/s)	b
花岗岩	2670	3600	1.00	大理岩	2700	4000	1.32
玄武岩	2670	2600	1.60	石灰岩	2600	3500	1.43
辉长岩	2980	3500	1.32	页岩	2000	3600	1.34
橄榄岩	3000	5000	1.44	盐岩	2160	3500	1.33

考虑到在冲击波的强烈压缩下, 粉碎区内的岩石极度粉碎, 故以流体为介质模型。因此对于炮孔柱状装药, 冲击波波阵面后的连续方程为

$$\frac{Ld}{L_t} + \frac{L(d_u)}{L_r} + \frac{u}{r} = 0 \quad (5)$$

式中: r 为冲击波的传播距离 (从炮孔中心算起的径向距离), t 为与 r 对应的冲击波传播时间。

冲击波传播过程中, 其波阵面后岩石介质密度变化很小, 变化量一般不超过 7.7% [2]。因此可将冲击波波阵面后岩石按等密度考虑, 即认为 d_m 常数, 这样上式变成

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0 \quad (6)$$

解此微分方程得

$$ur = C \quad (7)$$

式中: C 为待定常数。在孔壁处有如下边界条件

$$u_0 r_0 = C \quad (8)$$

式中: r_0 为炮孔半径, u_0 为孔壁岩石质点的初始移动速度。将其代入上式得

$$r = \frac{u_0}{u} r_0 \quad (9)$$

当冲击波传播到粉碎区边缘时衰变成岩石中的弹性应力波, 波速衰变为应力波速 c_p 。据 (4) 式知此时岩石质点的移动速度为

$$u_k = \frac{c_p - a}{b} \quad (10)$$

将其代入 (9) 式中可求得粉碎区半径为

$$r_k = \frac{bu_0}{c_p - a} r_0 \quad (11)$$

在孔壁处, 冲击波波速及波阵面后岩石状态参数满足以下各式

$$p_2 = d_m D_0 u_0 \quad (12)$$

$$D_0 = a + bu_0 \quad (13)$$

式中: D_0 为冲击波初速, u_0 为岩石质点初始移动速度, p_2 为孔壁透射压力, 耦合装药时

$$p_2 = \frac{d_m D_0 dD_e^2}{2(d_m D_0 + dD_e)} \quad (14)$$

式中: d 、 D_0 为炸药的密度和爆速。

取立 (12)、(14) 两式, 并将 (13) 式代入可求得如下形式的方程

$$A u_0^2 + B u_0 - C = 0 \quad (15)$$

式中: A 、 B 、 C 均为常数, $A = 2b d_m$, $B = 2(d D_0 + d_m a)$, $C = d D_0^2$ 。此式是关于 u_0 的一元二次方程, 解此方程便可求出 u_0

$$u_0 = \frac{1}{2A} (\sqrt{B^2 + 4AC} - B) \quad (16)$$

将其代入 (11) 式即可求得爆炸冲击波作用下的岩石粉碎半径

$$r_k = \frac{b r_0}{2A (c_p - a)} (\sqrt{B^2 + 4AC} - B) \quad (17)$$

3 冲击压缩时间

冲击波的冲击压缩时间是指以爆轰波撞击孔壁激起岩石中的爆炸冲击波到粉碎区边缘冲击波衰减为应力波这段时间, 亦即是冲击波在粉碎区内的传播时间或粉碎区的形成时间。

前已有述, 在粉碎区岩石介质近似为流体模型, 这样根据强爆炸问题的量纲分析有^[3]

$$r = \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/4} t^{1/2} \quad (18)$$

式中: r 为柱形冲击波的作用半径, t 为与 r 相对应的时间参数, E 为常数。上式对时间 t 求导可得冲击波的传播速度

$$D_r = \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2r} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/2} = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/4} t^{-1/2} \quad (19)$$

在初始时刻 $t = t_0$, 孔壁处压缩开始时的波速为

$$D_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/4} t_0^{-1/2} \quad (20)$$

同时据岩石介质的 RH 方程有

$$D_0 = a + b u_0 \quad (21)$$

联立 (20)、(21) 两式可求得初始压缩时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{1}{4(a + b u_0)^2} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/2} \quad (22)$$

在结束时刻 $t = t_k$, 粉碎区边缘处压缩结束时的波速为

$$D_k = \frac{1}{2} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/4} t_k^{-1/2} \quad (23)$$

而粉碎区边缘冲击波的波速 $D_k = c_p$, 代入上式可求得压缩结束时间 t_k 为

$$t_k = \frac{1}{4c_p^2} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/2} \quad (24)$$

因此冲击波的冲击压缩作用时间为

$$\Delta t = t_k - t_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{E}{d_m}\right)^{1/2} \left[\frac{1}{c_p^2} - \frac{1}{(a + b u_0)^2}\right] \quad (25)$$

对于设定常数 E 可用以下方法求解, 在粉碎区边缘冲击波波速也可表示成

$$D_k = \frac{1}{2r_k} \left(\frac{E}{d_m} \right)^{1/2} = c_p \quad (26)$$

由此求得常数

$$E = 4c_p^2 d_m r_k^2$$

4 扩腔半径

在冲击波作用下, 岩石被压缩, 岩石质点发生径向移动, 炮孔直径增大, 即发生扩腔作用, 当冲击波传播到粉碎区边缘时, 冲击压缩过程结束, 由冲击波引起的爆扩过程也随之终止。在此过程中冲击波后岩石遵守质量守恒, 并可表示成下式

$$(r^2 - r_0^2) d_m = \int_{r_0}^r 2r d \quad (27)$$

式中: r 为冲击波作用半径, r_1 为对应于 r 时的爆腔半径, d 为冲击波波阵面上岩石的瞬时密度。将上式变化, 并以压缩比 $\bar{d} = d/d_m$ 代入得

$$\int_{r_1}^r 2r \bar{d} dr = r^2 - r_0^2 \quad (28)$$

对于冲击波作用下岩石介质的压缩比可由鲍姆提出的状态方程求得, 该状态方程为

$$p_r = N (\bar{d} - 1) \quad (29)$$

式中: p_r 为冲击波峰值, 压力 N 为取决于熵的变量, 但考虑冲击波波速很高, 可忽略熵的变化, 即认为 N 为一常量, 鲍姆给出其取值 $N = d_m c_p^2 / 4$, n 为指数性常数, 取 $n = 4$

而冲击波峰值压力随传播距离的衰减关系为

$$p_r = p_2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \quad (30)$$

将其代入 (29) 式得

$$\bar{d} = \left[\frac{p_2^2}{N} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 + 1 \right]^{1/4} \quad (31)$$

再将 (31) 式代入到 (28) 式中得

$$\int_{r_1}^r 2r \left[\frac{p_2^2}{N} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 + 1 \right]^{1/4} dr = r^2 - r_0^2 \quad (32)$$

此式即表示了冲击波作用下的爆腔扩张规律。同样若认为冲击波传播过程中其波阵面后岩石密度保持不变, 并以孔壁波阵面后初始压缩密度 d_0 代替, 这样 (27) 式便可简化为

$$d_m (r^2 - r_0^2) = d_0 (r^2 - r_1^2) \quad (33)$$

简化后的爆腔扩张规律为

$$r_1 = \left[r^2 - (r^2 - r_0^2) \frac{d_m}{d_0} \right]^{1/2} \quad (34)$$

由公式可见, 同粉碎区形成过程一样, 爆腔扩张过程除了与冲击波的冲击压缩作用强度有关外, 还与炸药性质、岩石性质和炮孔几何尺寸有关。

在粉碎区边缘, 即 $r = r_k$ 时, 扩腔过程结束, 最终的扩腔半径为

$$R_k = \left[r_k^2 - (r_k^2 - r_0^2) \frac{d_m}{d_0} \right]^{1/2} \quad (35)$$

粉碎区内的岩石密度 ρ_0 可由连续方程 (1) 式和 RH 方程 (4) 式求得

$$d_0 = \frac{a + bu_0}{a + (b-1)u_0} d_n \quad (36)$$

将其代入到 (35) 式中得

$$R_k = [r_k^2 - (r_k^2 - r_0^2) \frac{a + (b-1)u_0}{a + bu_0}]^{1/2} \quad (37)$$

5 扩腔速度

将爆腔扩张规律方程 (34) 式对时间 t 求导即可求得爆腔扩张速度

$$v = \frac{dr}{dt} = [r^2 - (r^2 - r_0^2) \frac{d_n}{d}]^{1/2} (1 - \frac{d_n}{d}) \frac{r dr}{dt} \quad (38)$$

而 dr/dt 为冲击波的传播速度, 因此将 (19) 式代入得

$$v = \frac{1}{2} [r^2 - (r^2 - r_0^2) \frac{d_n}{d}]^{1/2} (1 - \frac{d_n}{d}) (\frac{E}{d_n})^{1/2} \quad (39)$$

以 $r=r_0$ 代入可得爆腔的初始扩张速度即孔壁初始移动速度为

$$v_0 = \frac{1}{2r_0} (1 - \frac{d_n}{d_0}) (\frac{E}{d_n})^{1/2} \quad (40)$$

冲击波压缩作用结束, 由冲击波引起的扩腔过程也就完成, 因此爆腔的扩张时间也就是冲击波的压缩作用时间。

6 结束语

通过以上对爆炸冲击波作用下岩石的变形和破坏特性的分析研究可知: 由冲击波的冲击压缩作用所引起的岩石粉碎区半径和扩腔半径除了主要与爆炸冲击波的冲击压缩作用强度有关外, 还与被爆岩石的本身性质 (炮孔原始尺寸) 有关; 冲击波强度越高, 岩石的可压缩性越强, 粉碎区和爆腔的形成尺寸就越大。当然我们只讨论了冲击波的压缩作用, 而实际爆腔的最终半径及粉碎区范围还与爆生气体的膨胀作用有关, 此问题将另外行文探讨。

参 考 文 献

- 1 王文龙. 钻眼爆破. 北京: 煤炭工业出版社, 1984 168
- 2 高金石, 张奇. 爆破理论与爆破优化. 西安: 西安地图出版社, 1993 30~ 31
- 3 谢多夫ЛИИ. 力学中的相似方法与量纲分析. 沈青, 等译. 北京: 科学出版社, 1982 237

INVESTIGATION ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ROCK FRAGMENTATION BY SHOCK WAVE

Zong Q i

(*H uainan Institute of M ining, H uainan, Anhui, 232001*)

ABSTRACT According to the theory of shock waves, the smash district and its forming time, the blasting cavity radius and its expanding characteristics are all discussed in this paper. The results show that the principal factors effecting the smash district and the blasting cavity radius are strength of the shock wave, the characteristics of rocks and radius of the hole.

KEY WORDS shock wave, smash district, blasting cavity