第10卷 第1期 爆炸与冲击 Vol.10, No.1
1990年1月 EXPLOSION AND SHOCK WAVES Jan., 1990

岩石爆破的粉碎区及其空腔膨胀

张 奇
（西安矿业学院）

摘要 本文根据爆炸冲击波的理论分析，讨论了柱形装药和球形装药的粉碎区半径、炮孔近区的压缩比、爆破空腔及其空腔的发展时间。通过分析，给出柱形装药的爆炸近区参数。计算结果表明：2号铵梯岩石炸药柱形装药在岩石介质中产生的粉碎区半径一般是炮孔半径的1.65～3.05倍，球装药在岩石介质中产生的粉碎区半径是球形装药半径的1.28～1.75倍；柱形装药在孔壁处的冲击波波长与炮孔半径属于同一量级；粉碎区内的平均压缩比为1.05～1.10。

关键词 岩石爆破，爆炸空腔 球形装药 柱形装药

1.前言

偶合装药在矿岩介质中爆炸以后，介质内通常可分为三个区域：粉碎区、破裂区和振动区。其中前两个是有效破坏区。关于爆炸三个区域的定量划分以及爆炸作用下炮孔孔壁变形过程和参数的研究有着重要意义，它是爆炸能量分析和工程爆破参数计算的依据。随着爆破工程参数优化设计的不断发展，根据岩石性质和炸药特性进行爆炸能量分析和爆破工程参数设计的要求越来越迫切。但目前定量地描述和分析柱形装药在岩体内的爆破分区问题的研究工作还不多。本文根据炮孔近区爆炸冲击波的力学模型，讨论了柱形装药、球形装药的粉碎区半径，并分析了两者的区别。对柱形装药炮孔近区的压缩性、爆炸空腔的发展等问题也进行了分析和研究，为考虑爆炸能量传递问题提供了参考依据。

2.粉碎区半径

1.柱形装药的粉碎区半径

在岩石爆破工程中，多采用柱形装药。但柱形装药爆炸近区的参数分析却不多见。柱形装药爆炸以后，在岩体内产生冲击波，在冲击波的传播过程中，波阵面参数（压力、波速、密度等）有如下关系[1]

动量守恒

$$\sigma_r = D v \rho_0 \tag{1}$$

质量守恒

$$D\rho_0 = \rho(D - v) \tag{2}$$

RH方程

$$D = a + bv \tag{3}$$

式中 σ_r——波阵面压力；D——冲击波速度；v——波阵面上的质点速度；ρ_0——岩石的初始密度；ρ——波阵面上岩石的密度；a、b——与岩石性质有关的冲击波常数。

1988年11月12日收到原稿，1989年1月11日收到修改稿。

冲击波波阵面后的连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial r}+\frac{\rho v}{r}=0 \tag{4}$$

冲击波波阵面之后的介质可按不可压缩流体模型来处理,即 $\rho=$ 常数。因此由（4）式可得

$$v=v_0/\bar{r} \tag{5}$$

式中 v_0——孔壁上的质点速度；$\bar{r}$——比例距离，$\bar{r}=r/r_0$，其中 r_0 是炮孔（装药）半径，r 是介质内某点到孔中心轴的距离；v——距孔中心轴为 r 处的质点速度。

将（5）式代入（3）式得

$$D=a+bv_0/\bar{r} \tag{6}$$

再由（1）、（5）、（6）式得

$$\sigma_r=\rho_0\left(\frac{av_0}{\bar{r}}+\frac{bv_0^2}{\bar{r}^2}\right) \tag{7}$$

如果认为柱形装药的爆轰是瞬间完成的，则根据孔壁边界条件有

$$\sigma_{r_0}=p_1\cdot\frac{2\rho_0D_0}{\rho_1D_1+\rho_0D_0} \tag{8}$$

式中 σ_{r_0}——孔壁透射压力；p_1——平均爆轰压力，$p_1=\rho_1D_1^2/8$；ρ_1、D_1——分别是装药的初始密度和爆速；D_0——孔壁处的冲击波速度。

由（1）式得

$$\sigma_{r_0}=v_0D_0\rho_0 \tag{9}$$

因此由（3）、（8）、（9）三式可得

$$v_0^2+Av_0-B=0 \tag{10}$$

式中 $A=(\rho_1D_1+\rho_0a)/\rho_0b$，$B=D_1^2\rho_1/4b\rho_0$。

由（10）式求出孔壁的质点速度

$$v_0=0.5(\sqrt{A^2+4B}-A) \tag{11}$$

根据文献［2］给出的 ρ_0、a、b 值计算出相应的孔壁质点速度（极值）、其中 ρ_1、D_1 按2号铵梯岩石炸药计算，取 $\rho_1=1000\ \mathrm{kg/m^3}$，$D_1=3600\ \mathrm{m/s}$。孔壁质点速度（极值）的计算值如表1。

表1　孔壁质点速度计算值

Table 1　calculated values of the particle velocity on the holewall

岩　石	密度/(kg/m³)	a/(m/s)	b	v_0/(m/s)
花岗岩	2670	3600	1.00	234
玄武岩	2670	2600	1.60	276
辉长岩	2980	3500	1.32	218
大理岩	2700	4000	1.32	214
页　岩	2000	3600	1.34	280

设σ_s是爆炸近区岩石的动态抗压强度，有

$$\sigma_s = N[\sigma] \tag{12}$$

式中 $[\sigma]$ ——岩石静态单向抗压强度；N——动压强度提高系数，$N = 10 \sim 15$ [2]。

因为2号铵梯岩石炸药属于中低威力的炸药，故近似取$N = 10$。σ_s与相应的质点速度极限v_s有如下关系

$$v_s = \sigma_s / \rho_0 c_P \tag{13}$$

式中c_P是岩石介质内的纵波（声）速。在粉碎区的边缘应有$v = v_s$,将（5）式和（13）式代入上式有

$$\frac{\sigma_s}{\rho_0 c_P} = \frac{v_0}{\bar{r}} \tag{14}$$

将（12）式代入（14）式，并整理得到粉碎区半径

$$r_s = r_0 \left(\frac{v_0 \rho_0 c_P}{N[\sigma]} \right) \tag{15}$$

参考文献［2］，取岩石的纵波速度和静态单向抗压强度$[\sigma]$的相对比值（$c/[\sigma]$），并按$N = 10$计算，由（15）式可得到表2。由表2可知，柱形装药的粉碎区半径一般是炮孔初始半径（装药半径）的1.65～3.05倍，软岩粉碎区较大，硬岩粉碎区较小。

表2 柱形装药的粉碎区半径

Table 2 Radii of smash districts by cylindric charges

岩 石	v_0/(m/s)	ρ_0/(kg/m^3)	$c_P/[\sigma]$/[(m/s)/(N/m^2)]	r_s/r_0
花岗岩	234	2670	29.8×10^{-6}	1.90
玄武岩	276	2670	24.9×10^{-6}	1.85
辉长岩	218	2980	23.2×10^{-6}	1.78
大理岩	214	2700	28.6×10^{-6}	1.65
页 岩	280	2000	54.5×10^{-6}	3.05

2.球形装药的粉碎区半径

显然（1）、（2）、（3）式同样适用于球形装药在岩石介质内产生的冲击波。对于球形装药，冲击波波阵面后的连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v}{\partial r} + 2\frac{\rho v}{r} = 0 \tag{16}$$

同样，如果认为冲击波波阵面后的介质是不可压缩的，即ρ=常数，则上式变为

$$\frac{\partial v}{\partial r} + 2\frac{v}{r} = 0 \tag{17}$$

解得

$$v = v_0 / \bar{r}^2 \tag{18}$$

式中v_0——球形装药空腔的初始质点速度（极值）；$\bar{r}$——某点到装药中心的距离与装药半径的比值。

显然v_0仍可由（11）式来确定。在粉碎区的边缘有$v = v_s$,将(13)和(18)式代入上式有

$$\frac{\sigma_s}{\rho_0 c_P} = \frac{v_0}{\bar{r}^2} \tag{19}$$

将（12）式代入（19）式，并整理得到球形装药在岩石介质中产生的粉碎区半径

$$r_s = r_0\left(\frac{v_0 \rho_0 c_P}{N[\sigma]}\right)^{1/2} \tag{20}$$

这里 r_0 是球形装药的半径。

仍参考文献［2］取岩石的静态单向抗压强度［σ］和岩体内的弹性纵波速度 c_P 的相对值，并取 $N=10$，再根据表1计算出的空腔速度初值，由（20）式可得表3。

表3　球形装药的粉碎区半径

Table 3　Radii of smash districts by spherical charges

岩　石	v_0/(m/s)	ρ_0/(kg/m^3)	c_P/[σ]/[(m/s)/(N/m^2)]	r_s/r_0
花岗岩	234	2670	29.8×10^{-6}	1.40
玄武岩	276	2670	24.9×10^{-6}	1.40
辉长岩	218	2980	23.2×10^{-6}	1.33
大理岩	214	2700	28.6×10^{-6}	1.28
页　岩	280	2000	54.5×10^{-6}	1.75

辉长岩、玄武岩、大理岩是有代表性的硬岩，而页岩是有代表性的软岩，由表3可知，球形药包在岩石内质产生的粉碎区半径一般是炮孔半径的1.28～1.75倍，与柱形装药相比，其粉碎区半径较小。本文得到的粉碎区半径与经验数值（一般认为粉碎半径是装药半径的2倍左右）是吻合的，并定量地分析了两者的差别。

3.粉碎区内的压缩性

对于柱形装药，由（2）、（3）和（5）式可得

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{a\bar{r} + b v_0}{a\bar{r} + (b-1) v_0} \tag{21}$$

由上述分析可知 $r_s/r_0 < 4$，因此不妨设 $r_s = 4r_0$，则 r_s 处的密度为

$$\rho_4 = \rho_0 \cdot \frac{4a + b v_0}{4a + (b-1) v_0}$$

其中 ρ_4 是 $r_s = 4r_0$ 处的冲击波波阵面上的介质密度。而孔壁处的冲击波波阵面上的介质密度为

$$\rho_{\bar{r}=1} = \rho_0 \frac{a + b v_0}{a + (b-1) v_0}$$

因 $(b-1) \leqslant 0.6$，并且有 $v_0/a \leqslant 0.1$，因此 $(b-1)v_0$ 在上两式中可略去不计，这样由上两式可知

$$\frac{\rho_{\bar{r}=1}}{\rho_4} = \left(1 + \frac{b v_0}{a}\right)\left(\frac{1}{1 + b v_0/4a}\right) \tag{22}$$

将有关数据代入，计算得到表4。由表4可知在粉碎区内，密度随距离的变化量很小，

表4 柱形装药的$\rho_{\bar{r}=1}/\rho_4$值

Table 4 $\rho_{\bar{r}=1}/\rho_4$ by cylindric charges

岩石	a/(m/s)	b	v_0/(m/s)	$\rho_{\bar{r}=1}/\rho_4$
花岗岩	3600	1.00	234	1.048
玄武岩	2600	1.60	276	1.077
辉长岩	3500	1.32	218	1.059
大理岩	4000	1.32	214	1.052
页岩	3600	1.34	280	1.076

一般不超过7.7%，因此，认为冲击波波阵面以后介质的密度ρ=常数是合理的．并且可以按孔壁处波阵面上的介质密度作为粉碎区内波阵面后介质的平均密度，有关计算结果如表5。由表5可知，对于柱形装药在岩体内产生的粉碎区（采用2号铵梯岩石炸药），其介质的

表5 柱形装药的$\rho_{\bar{r}=1}(\approx\rho)$值

Table 5 $\rho_{\bar{r}=1}(\approx\rho)$ by cylindric charges

岩石	a/(m/s)	b	v_0/(m/s)	$\rho_{\bar{r}=1}(\approx\rho)$
花岗岩	3600	1.00	231	$1.065\rho_0$
玄武岩	2600	1.60	276	$1.100\rho_0$
辉长岩	3500	1.32	218	$1.053\rho_0$
大理岩	4000	1.32	214	$1.061\rho_0$
页岩	3600	1.34	280	$1.076\rho_0$

压缩比ρ/ρ_0一般为1.05～1.10，即波通过后的密度比波阵面之前介质的密度大5.1～10%。

同理，对于球形装药，$r_s/r_0\approx 2$，不妨设$r_s=2r_0$，由（2）、（3）、（18）式可得

$$\rho=\rho_0\frac{a\bar{r}^2+bv_0}{a\bar{r}^2+(b-1)v_0}$$

而在$r_s=2r_0$处有

$$\rho_2=\rho_0\frac{4a+bv_0}{4a+(b-1)v_0}$$

孔壁处冲击波波阵面上的介质密度为

$$\rho_{\bar{r}=1}=\rho_0\frac{a+bv_0}{a+(b-1)v_0}$$

同理，略去上两式中的$(b-1)v_0$，这样由上两式可得

$$\rho_{\bar{r}=1}/\rho_2=\left(1+\frac{bv_0}{a}\right)\left(\frac{1}{1+\frac{bv_0}{4a}}\right)$$

可见上式与（22）式等同，只是球形装药的粉碎半径是 $2r_0$。因此对于球形装药来说，可以得到与柱形装药在岩石爆破粉碎区内相一致的压缩比。在球形装药的粉碎区内，仍然可以用空腔壁处的冲击波波阵面上的介质密度来代替粉碎区内波后介质的平均密度，误差不超过7.7%。粉碎区内的压缩比一般也是1.05～1.10。

4. 空腔半径

根据柱形装药在岩体内产生的冲击波，波阵面以后介质的质量守恒为

$$(r^2-r_0^2)\rho_0=\bar{\rho}\,(r^2-r_1^2) \tag{23}$$

式中 r—冲击波半径；r_1—某一瞬时（对应于冲击波半径 r）的炮孔半径。

由（23）式得

$$r_1=[r^2-(r^2-r_0^2)/(\bar{\rho}/\rho_0)]^{1/2} \tag{24}$$

令 $r=r_s$，即当冲击波到达粉碎区边缘时，炮孔的半径变为 r_1。（24）式可写成

$$r_1/r_0=\left[(r_s/r_0)^2-\frac{(r_s^2/r_0^2-1)}{(\bar{\rho}/\rho_0)}\right]^{1/2} \tag{25}$$

对于2号岩石铵梯炸药，由表2、表5的有关数据得到表6。由表6可知，在冲击波到达粉碎区边缘时，炮孔空腔半径是原来孔半径的1.05、1.26倍。

类似地，当球形爆炸冲击波到达粉碎区边缘时，其爆炸空腔也可由粉碎区半径求出。同

表6　柱形装药的岩石冲击波半径与炮孔半径的关系

Table 6　Relationships between the Radius of the shock wave and that of the hole in various rocks

岩　石	r_s/r_0	$\bar{\rho}/\rho_0$	r_1/r_0	$\Delta r_0/r_0=(r_1-r_0)/r_0$
花岗岩	1.90	1.065	1.08	0.08
玄武岩	1.85	1.100	1.10	0.10
辉长岩	1.78	1.053	1.05	0.05
大理岩	1.65	1.061	1.05	0.05
页　岩	3.05	1.076	1.26	0.26

理，对于球形装药在介质内产生的冲击波，波阵面以后介质的质量守恒为

$$(r^3-r_0^3)\rho_0=\bar{\rho}\,(r^3-r_1^3) \tag{26}$$

上式可得

$$r_1=[r^3-(r^3-r_0^3)/(\bar{\rho}/\rho_0)]^{1/3}$$

令 $r=r_s$，整理后可得

$$r_1/r_0=\left[(r_s/r_0)^3-\frac{(r_s^3/r_0^3-1)}{(\bar{\rho}/\rho_0)}\right]^{1/3} \tag{27}$$

上式即为球形装药在岩体内的爆炸冲击波半径与空腔半径的关系。

爆炸空腔的大小在一定程度上反映了炸药对岩体的作功情况，在相同条件，空腔越大，炸药作功就越多。而空腔大小不完全取决于岩石和炸药的声阻抗的匹配情况，还与岩石动态强度等其他因素有关，因此应采用多因素进行岩石可爆性分析[3]，以阻抗匹配作为选取炸药品

种的唯一标准是不完善的。

5.爆炸空腔发展时间

当冲击波达到粉碎区边缘时，炮孔孔壁的膨胀时间可由下式求出。冲击波速为

$$dr/dt = D \tag{27}$$

其中t是时间（与冲击波半径r相对应）。将（6）式代入（27）式，并积分整理得到炮孔（柱装药）孔壁的膨胀时间（这时冲击波刚好到达粉碎区边界）

$$t = r_0\left[\frac{(r_s/r_0)-1}{a} - \frac{v_0 b}{a^2}\ln\left(\frac{1+ar_s/bv_0r_0}{1+a/bv_0}\right)\right] \tag{28}$$

由上式可以看出，炮孔孔壁发展时间取决于炮孔半径和岩石力学性质及炸药的爆轰参数。对于2号铵梯岩石炸药，根据表1、表2中有关数据可得表7。由表7可知，如果把空腔的发展时间作为冲击波的作用时间，那么冲击波波长与炮孔半径处于同一量级（在炮孔孔壁处）。

表7 柱形爆炸空腔的发展时间

Table 7 Expanding times of cylindric cavites by explosions

岩石	$a/(m/s)$	b	$v_0/(m/s)$	r_s/r_0	$(t/r_0)/(s/m)$
花岗岩	3600	1.00	234	1.90	2.39×10^{-4}
玄武岩	2600	1.60	276	1.85	2.81×10^{-4}
辉长岩	3500	1.32	218	1.78	2.10×10^{-4}
大理岩	1000	1.32	214	1.65	1.54×10^{-4}
页岩	3600	1.34	280	3.05	5.36×10^{-4}

6.结语

通过对2号铵梯岩石炸药与几种岩石的分析、计算，得到如下几点结论：

（1）对于柱形装药，岩石爆破的粉碎区半径一般是炮孔半径的1.65～3.05倍；球形装药的粉碎区半径一般是装药半径的1.28～1.75倍。

（2）粉碎区内，冲击波波阵面以后的介质可按密度等常数来考虑，误差不大于7.7%。在计算范围内所采用的岩石和炸药，冲击波的压缩性（波阵面后的介质密度与波阵面前的介质密度之比）为1.05～1.10。

（3）炮孔发展半径一般是炮孔初始半径的1.05～1.26倍。空腔发展时间与炸药、岩石和炮孔半径有关，孔壁处的冲击波波长与炮孔半径处于同一量级。

（4）本文在选取基本参数时可能对计算结果有一定影响。主要是纵波速度和静抗压强度选取不一定十分准确。但是这两个参数是选自同一文献，而且两者具有相关性，误差可能主要反映在第（15）式中。但由（15）式可知，纵波波速如果与抗压强度同时增大或减小对计算结果即使有影响，这种影响也不会在数量级上发生明显误差，因为对于某种岩石，抗压强度较大时，纵波速度一般也较大，是正比关系。因此只要这两个参数相对应，就可以保证计算结果在数量级上的准确性。

参　考　文　献

[1] 哈努卡耶夫，A.H.，刘殿中译，矿岩爆破物理过程，冶金工业出版社，北京，(1980)，63.

[2] 王文龙，钻眼爆破，煤炭工业出版社，北京，(1984)，167，9.

[3] 张　奇，有色金属（矿山部分），(2)(1988)，40.

SMASH DISTRICTS AND EXPANDING OF CAVITIES IN ROCK BLASTING

Zhang Qi

(Xian Mining Institute)

ABSTRACT According to theoretical analysis of the shock wave, the smash district radius by the cylindrical or spherical charge, the compression ratio in the smash district, the cavity and its expanding time are all discussed in the paper. Through anaylsis, the explosion parameters near the hole by cylindrical charge are gotten. The calculated results show: for No.2 Anti Rock explosive, generally, the radius of the smash district by cylindrical charge is 1.65～3.05 times as large as that of the hole and the radius of the smash district by the spherical charge is 1.28～1.75 times as large as that of the charge; The shock wave length in the hole wall by the cylindrical charge is the same order of magnitude as the radius of the hole; The average compression ratio in the smash district is 1.05～1.10.

KEY WORDS rock blasting, cavity by explosion, cylindrical charge, spherical charge.