

岩石爆破孔壁初始冲击波压力的理论计算与拟合

倪芝芳 李玉民

(山东矿业学院爆破研究所 泰安 271019)

提要 对在充分考虑炸药性能、岩石特性和爆轰波与孔壁相互作用等重要因素下的孔壁初始冲击波压力 P_m 的计算结果进行了回归分析,得到了中威力炸药耦合装药孔壁初始冲击波压力 P_m 的指数型表达式。利用该公式计算的 P_m 与实验测试结果吻合较好。

关键词 耦合装药, 孔壁初始冲击波压力, 回归分析

1 引言

国内外爆破研究者曾对如何计算孔壁初始冲击波压力 P_m 进行了一些探讨和研究,并给出了计算方法^[1-3]。但这些算法都是基于爆轰波正入射孔壁为刚壁的物理模型,其结果必然是孔壁压力 P_m 沿炮孔轴线方向分布均匀。然而,测试结果表明:轴向方向上,孔壁压力 P_m 的分布是不均匀的,而与距起爆点的距离 L 有关。这是因为对于柱状装药,其装药直径远小于炮孔长度,一点或多点起爆的爆轰波以起爆点为中心球面波的形式传播。爆轰波遇到孔壁将产生斜入射(并非正入射)。同时,相对巨大的爆轰压力,孔壁将产生一定角度的变形。由于炸药、岩石特性及爆轰波与孔壁相互作用等各种因素的影响,使孔壁初始冲击波压力随离起爆点距离的不同而变化。因此,有必要建立正确的符合爆破实际的孔壁初始冲击波压力计算公式。

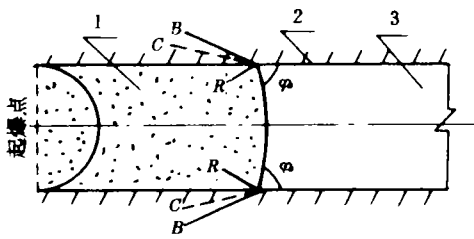
2 物理模型简介

一柱状装药,在轴线某点起爆,爆轰波以球面波的形式传播。爆轰波遇孔壁产生斜入射(OA),如图1所示,入射角为 ϕ_0 ,并在爆轰产物中形成反射波(OR)。由于爆轰波的强冲击作用,孔壁将发生压缩变形(OC),变形角为 ε ,同时岩石中产生折射斜冲击波(OB),该击波即为孔壁初始冲击波,其压力峰值即为所求的初始冲击波压力 P_m 。

3 计算结果回归分析

依上述物理模型并利用冲击波和爆轰波理论可建立初始冲击波 OB 的压力计算方法。

1996年2月25日收到初稿,1996年7月30日收到修改稿。



1— 爆轰产物 2—孔壁 3—原始炸药

图1 物理模型

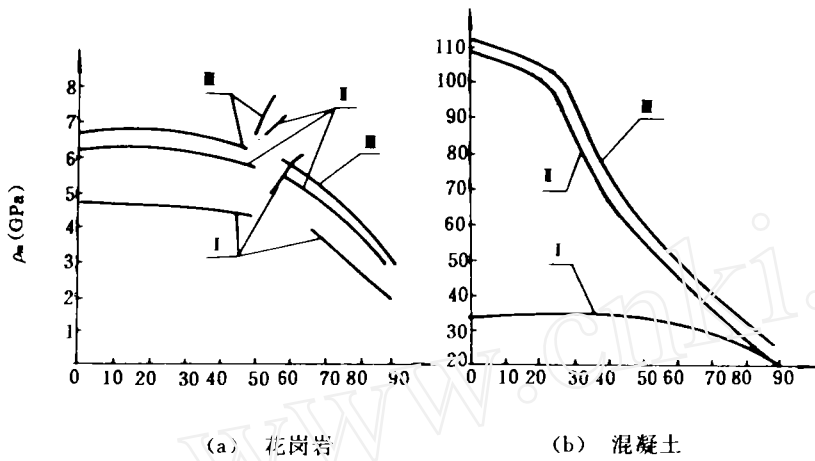
Fig.1 Physical model

笔者对各种炸药作用下的 P_m 进行了计算。计算表明^[4]：自起爆点沿炮孔轴线 P_m 是变化的，如图 2 所示。图中 Φ_0 由下式计算：

$$\Phi_0 = \arctg \frac{L}{R} \quad (1)$$

式中： L 为计算点至起爆点的水平距离； R 为炮孔半径或装药半径，参见图 3。由式(1)可见，当 R 确定后， L 的变化就唯一地确定了 Φ_0 的变化。

文献[4]给出了考虑各主要因素的 P_m 计算方法，型式相当复杂，计算过程很繁，应用不方便。为此，对图 2 所示的计算结果进行回归分析，可得到较简易、实用的 P_m 计算式。



(a) 花岗岩 (b) 混凝土

图2 压力 P_m 随 Φ_0 的变化

Fig.2 The variance of P_m with Φ_0 .

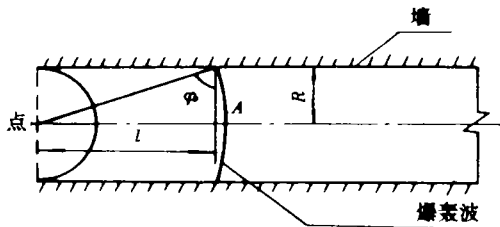


图3 Φ_0 与 L 间的关系

Fig.3 The relationship between Φ_0 and L

图 2 表明：当 $\Phi_0 = 0 - 60^\circ$ 或 $L = R \tan \Phi_0 (0 - 1.73)R$ ，即在距起爆点 1.73 倍装药半径范围内， P_m 随 Φ_0 的变化较复杂。但当 $\Phi_0 > 60^\circ$ 后， P_m 随 Φ_0 的变化趋势基本呈指数形式衰减。实际爆破中，装药长度远大于装药半径，故可以略去 1.73R 范围内 P_m 所发生的变化，而对于 $L \geq 1.73R$ 即 $\Phi_0 \geq 60^\circ$ 范围进行回归与拟合。

由图 2 或表 1 所示的 $P_m - \Phi_0$ 关系，对中威力炸药 2# 岩石硝铵、乳化和水胶炸药分别作用于花岗岩和混凝土 P_m 随 Φ_0 的变化进行了回归分析。据最小二乘法得到下述指数型计算公式。

表 1 压力 P_m 随 Φ_0 的变化
Table 1 The variance of P_m with Φ_0

Φ_0 (°)	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88
A_1	31.39	30.90	30.61	29.92	28.93	28.06	27.47	26.49	25.51	24.33	23.15	22.07	21.58	20.80	20.11
A_2	45.32	44.15	42.18	40.71	39.24	37.28	35.81	34.34	32.86	31.88	29.43	27.47	26.49	24.53	22.56
A_3	49.54	47.87	46.11	43.65	41.20	39.24	37.96	36.10	34.34	33.35	31.49	30.41	29.43	27.47	25.51
P_m (GPa)	B_1			3.81	3.71	3.60	3.43	3.23	3.11	2.99	2.77	25.31	2.36	2.29	21.39
	B_2			4.81	4.73	4.51	4.41	4.25	4.09	3.92	3.64	3.41	3.19	3.14	2.94
	B_3			5.32	5.23	5.15	4.81	4.69	4.58	4.49	4.09	3.92	3.85	3.60	3.36
注	A_1, A_2, A_3 代表 2# 岩石、乳化、水胶炸药分别用于混凝土, B_1, B_2, B_3 代表 2# 岩石、乳化、水胶炸药分别作用于花岗岩														

$$P_m = K_1 e^{K_2/\Phi_0} \tag{2}$$

式中: P_m 为孔壁初始冲击波压力, GPa; K_1, K_2 分别为回归系数, 由炸药性能、岩性等综合决定, 见表 2; Φ_0 为爆轰波入射孔壁的入射角, rad.。回归分析中, 各相关系数 $|r|$ 均接近于 1, 剩余均方根差 S 亦较小, 表明 P_m 与 Φ_0 的指数型关系有较好的置信度。

表 2 回归系数
Table 2 The regressive coefficients

炸药	2# 岩石硝铵		乳化炸药		水胶炸药	
	混凝土	花岗岩	混凝土	花岗岩	混凝土	花岗岩
K_1 (GPa)	7.698	0.377	5.925	0.671	6.838	0.912
K_2	1.543	2.739	2.210	2.334	2.120	2.090
r	0.974	0.979	0.976	0.978	0.994	0.975
S	0.038	0.042	0.049	0.037	0.027	0.035

表 3 压力计算值与实测值对比
Table 3 The contrast between calculation results and measurement's of P_m

L (cm)	Φ_0 (°)	P_m (GPa)		绝对误差 (GPa)	相对误差(%)
		实测值	计算值		
8	78.7	3.074	2.776	0.298	9.7
28	86.7	2.508	2.305	0.203	8.1

4 回归公式与测试结果对比分析

用锰铜压阻测试系统量测了装药半径 $R = 16\text{mm}$ 的 2# 岩石炸药作用于花岗岩, 距起

爆点 $L = 8\text{cm}$ 和 28cm 处孔壁的 P_m 分别为 3.074GPa , 2.508GPa 。将 $L = 8\text{cm}$ 和 28cm 分别代入式(1)求得 ϕ_0 ，由 ϕ_0 和式(2)可得相应的 P_m ，计算与测试结果的对比列于表 3，两者相对误差小于 10%，表明该回归公式是可靠的。

5 结论

本文对在考虑炸药特性、岩石性能及爆轰波与孔壁相互作用等影响因素下得到的孔壁初始冲击波压力计算结果进行了回归分析，得到了中威力炸药耦合装药孔壁初始冲击波压力的指数型计算式。该公式型式简单、使用方便。用该公式计算出的压力值与测试结果吻合较好。该公式的提出将有助于岩石爆破动态应力场的定量分析，因此具有一定的理论意义和工程实用意义。

参 考 文 献

- 王文龙：钻眼爆破。北京：煤炭工业出版社，1984
- Qian Liu: A theoretical approach to the stress wave around a borehole and their effect on rock crushing. *Proceeding of 4th Int. Symp. on Rock Frag. by Blasting*, Rossmanith(ed), Balkema Rotterdam, 1993; 10-13
- 杜俊林, 宗琦: 孔壁初始爆炸冲击波压力的理论探讨. 岩石破碎专集, 东北大学学报, 1995, 10: 120-121
- 倪芝芳: 耦合装药孔壁动态初始参量的数值模拟与实验研究. 硕士论文, 山东矿业学院, 1994

THEORETICAL CALCULATION AND REGRESSION ON INITIAL SHOCK WAVE PRESSURE OF BOREHOLE IN ROCK BLASTING

Ni Zhifang Li Yumin

(Blasting Institute, Shandong Institute of Mining and Tech., Taian, 271019)

Abstract The regressive analyses have been carried out for the calculation results of initial shock pressure P_m of borehole which are gotten by taking many influence factors into full account such as the properties both of explosives and rocks, the interaction between detonation wave and borehole wall. The calculation formulas of exponential function of P_m of coupling charge have been achieved on the action of medium explosives in rock blasting. The calculation results of P_m with the formulas tally with those by measuring.

Key words coupling charge, initial shock wave pressure of borehole wall, regression analysis