

光面爆破空气垫层装药轴向不耦合系数理论研究

宗琦¹, 陆鹏举^{1,2}, 罗强¹

(1. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 中国煤炭第三建设公司, 安徽 宿州 234000)

摘要: 空气垫层装药是岩石光面爆破常采用的一种有效装药结构。预留的空气垫层降低了爆轰波和爆生气体压力, 减少了其对孔壁岩石的冲击压缩破坏, 延长了炮孔中爆生气体的存在时间, 提高了爆生气体准静压力作用下岩石光面爆破断裂成缝的质量。根据光面爆破的要求, 从理论上探讨了空气垫层装药结构主要参数轴向不耦合系数的计算方法, 并以部分岩石为例进行了实例计算。在此基础上将此方法应用于工程实践, 取得了良好的光面爆破效果。

关键词: 爆破工程; 光面爆破; 装药结构; 空气垫层; 轴向不耦合系数

中图分类号: TD 235.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-1047-05

THEORETICAL STUDY ON AXIAL DECOUPLING COEFFICIENTS OF SMOOTH BLASTING WITH AIR CUSHION CHARGING CONSTRUCTION

ZONG Qi¹, LU Peng-ju^{1,2}, LUO Qiang¹

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Third Coal Construct Corporation of China, Suzhou 234000, China)

Abstract: Charged with air cushion, the blasting mechanism of smooth blasting with soft cushion charging construction is studied. Namely, the soft cushion can not only decrease the pressure of explosion shock waves and explosive gases in order to reduce the shock compress breaking on hole-wall, but also can extend the action time of explosive gas-pressure and improve the quality of breaking cracks of smooth blasting under the quasi-static pressure of explosive gases. According to the requirements of smooth blasting, axial decoupling coefficients of charging construction with air soft cushion are analyzed. Correspondingly, the theoretical calculation formulas are presented. Finally, the axial decoupling coefficient values of smooth blasting in some rocks with air layer are calculated, and the air soft cushion charging construction is used in engineering practice of smooth blasting. The results show that air soft cushion is an effective smooth blasting charging construction.

Key words: blasting engineering; smooth blasting; charging construction; air cushion; axial decoupling coefficient

1 引言

理论研究和生产实践证明, 较为合理的光面爆破和预裂爆破等断裂成型控制爆破装药结构是炮孔

不耦合装药^[1-3], 包括径向间隙不耦合和轴向垫层不耦合装药结构, 较多是以空气作为不耦合介质。因空气的波阻抗值相对岩石要小得多, 爆炸冲击波在空气中传播时得到了缓冲, 压力峰值大大降低, 从而消除或减少了孔壁岩石的压缩性破坏; 同时,

收稿日期: 2003-09-15; **修回日期:** 2003-12-10

基金项目: 安徽省教育厅自然科学基金重点项目

作者简介: 宗琦(1962-), 男, 硕士, 1983年毕业于淮南矿业学院矿山建设专业, 现任教授, 主要从事爆破工程、矿建工程及岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: qzong62@126.com。

空气间隙或空气垫层的存在延长了爆生气体的作用时间，为孔间贯通光面爆破裂缝的形成创造了更为有利的条件；爆生气体压力沿炮孔全长均匀分布，改善了岩石的破碎块度^[4, 5]。

文[6]的研究表明，炮孔轴向空气垫层装药时，轴向不耦合系数在很大程度上影响着孔壁峰值压力的大小和炮孔爆生气体准静压力作用时间的长短。图1为轴向不耦合系数与孔壁峰值应力及正压力作用时间的关系曲线。很显然，随着轴向不耦合系数的增大，压力峰值降低，而正压力作用时间延长。近期对炮孔轴向空气垫层装药结构的研究也取得了新的进展，孔底爆炸应力波的反射增强了底部岩石的破碎，提高了爆破能量的有效利用率^[7]。

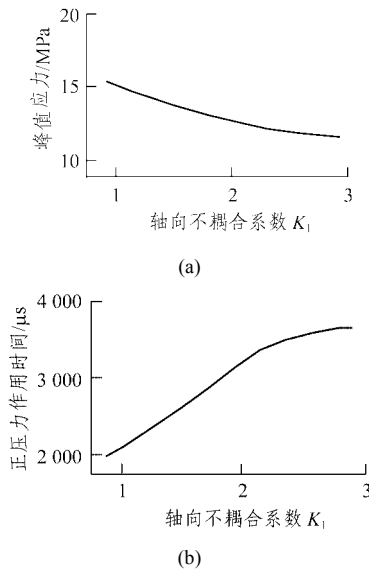


图1 轴向不耦合系数与孔壁峰值应力及正压力作用时间的关系曲线

Fig.1 Relationship of axial decoupling coefficient, peak stress, and time of pressure

为了获得理想的光面爆破效果，在确定缓冲软垫层装药结构参数时，应从以下几个方面综合分析：

- (1) 为保证孔壁岩石不发生压缩性破坏，就必须要求作用于孔壁岩石上的初始径向应力峰值低于岩石的抗压强度；
- (2) 为保证炮孔连心线方向孔壁起裂，就必须要求作用于孔壁岩石上的初始切向应力峰值高于岩石的抗拉强度；
- (3) 为保证形成孔间贯通裂缝，就必须要求炮孔间距要小于爆生裂缝的长度。

基于上面的分析，作者主要探讨空气垫层装药结构参数中起决定作用的轴向不耦合系数的理论计

算方法。

2 炮孔爆生气体准静压力

根据凝聚体炸药爆轰理论，炮孔内装药爆轰结束后，炮孔内爆生气体的初始平均压力 p_0 为^[8]

$$p_0 = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \tag{1}$$

式中： ρ_0 为炸药密度， D 为炸药爆速。

依据热力学原理，爆生气体在炮孔中发生等熵绝热膨胀，当其膨胀压力 $p > p_k$ (p_k 为临界压力，通常取 $p_k = 200$ MPa) 时，压力变化遵循如下规律^[9]：

$$p = p_0 \left(\frac{V_c}{V_1} \right)^6 \tag{2}$$

而当 $p < p_k$ 时，压力变化遵循如下规律：

$$p = p_k \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{4}{9}} \left(\frac{V_c}{V_1} \right)^{\frac{4}{3}} \tag{3}$$

式中： $V_c = \pi d_c^2 L_c / 4$ 为炮孔装药体积， d_c 为炮孔装药直径， L_c 为装药长度； V_1 为爆生气体膨胀时所占体积。

因为空气具有极强的可压缩性，所以，当为空气垫层装药时，爆生气体迅速膨胀充满整个炮孔，此时，爆生气体所占体积即为炮孔体积 V_b ，即 $V_1 = V_b = \pi d_b^2 L_b / 4$ 。其中， d_b 为炮孔直径； L_b 为炮孔长度。考虑到光面爆破均采用较大的径向或轴向不耦合系数，爆生气体膨胀充满炮孔时的压力较 p_k 低得多，故目前国内外大都用式(3)计算爆生气体充满整个炮孔时的准静压力 p_a 。将 V_c 和 V_1 代入式(3)可得

$$p_a = p_k \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{4}{9}} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{\frac{8}{3}} \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{\frac{4}{3}} \tag{4}$$

以径向不耦合系数 K_d ($K_d = d_b / d_c$) 和轴向不耦合系数 K_l ($K_l = L_b / L_c$) 代入式(4)可得

$$p_a = K_d^{-\frac{8}{3}} K_l^{-\frac{4}{3}} p_k \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{4}{9}} \tag{5}$$

视爆生气体压力为静压力，其在炮孔周围岩石中形成的应力场可用承受均匀内压的厚壁圆筒理论求解，径向和切向应力值^[10]为

$$\sigma_{r(\theta)} = \mp p_a \left(\frac{r_b}{r} \right)^2 \tag{6}$$

式中： $\sigma_{r(\theta)}$ 为岩石中某点的径向和切向应力， r_b 为炮孔半径， r 为该点的径距。

该式表明，径向应力和切向应力的绝对值相等，但符号相反，径向应力为压应力，切向应力为拉应力。在孔壁处，初始应力峰值(绝对值)为

$$\sigma_{r0} = \sigma_{\theta0} = p_a \quad (7)$$

3 轴向不耦合系数

空气垫层光面爆破装药结构参数中最重要的是轴向不耦合系数，依据前文对装药结构提出的几点要求分别作如下求算：

(1) 为保证孔壁岩石不发生压缩性破坏，就必须要求作用于孔壁岩石上的初始径向应力峰值低于岩石的抗压强度，即有 $\sigma_{r0} < S_c$ ，因此有

$$K_d^{\frac{8}{3}} K_1^{\frac{4}{3}} p_k \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{4}{9}} < S_c \quad (8)$$

由此求得满足此条件的轴向不耦合系数为

$$K_1 > \frac{1}{K_d^2} \left(\frac{p_k}{S_c} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中： S_c 为岩石抗压强度。

(2) 为保证炮孔连心线方向孔壁起裂，就必须要求作用于孔壁岩石上的初始切向拉应力峰值高于岩石的抗拉强度，而由于相邻炮孔间的导向作用，在炮孔连心线方向上将产生拉应力集中现象，且孔壁处最强，因而造成孔壁岩石上的初始切向拉应力值增大。依据 $K_\theta \sigma_{\theta0} > S_t$ ，故有

$$K_\theta K_d^{\frac{8}{3}} K_1^{\frac{4}{3}} p_k \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{4}{9}} > S_t \quad (10)$$

由此求得满足此条件的轴向不耦合系数为

$$K_1 < \frac{1}{K_d^2} \left(\frac{K_\theta p_k}{S_t} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

式中： S_t 为岩石抗拉强度； K_θ 为孔壁处拉应力集中系数，与炮孔间距 E 和炮孔直径 d_b 有关，如图 2 所示^[11]，一般情况下光面爆破时 $E = (10 \sim 15)d_b$ ，所以，可近似取 $K_\theta = 2$ 。

注意，此要求所求得的轴向不耦合系数是仅保证孔壁起裂的极限值。

(3) 为保证形成孔间贯通裂缝，就必须要求炮孔间距小于爆生裂缝的长度。

依据爆炸应力波和爆生气体在裂缝形成过程中的综合作用，各装药爆破后在岩石中激起的应力波先在各自炮孔壁上产生初始裂缝，然后在爆生气体

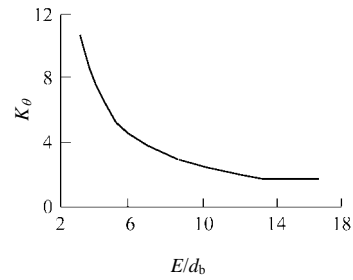


图 2 拉应力集中系数曲线

Fig.2 Curve of centralized coefficient of tension stress

静压作用下使之扩展贯通。因此，形成贯通裂缝的条件可近似表示为

$$E = R_c + R_a \quad (12)$$

式中： R_c ， R_a 分别为爆炸应力波和爆生气体静压作用下产生裂缝的长度，且有

$$R_c = r_b \left(\frac{\beta p_r}{S_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (13)$$

$$R_a = r_b \left(\frac{p_a}{S_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中： $\alpha = 2 \pm \mu / (1 - \mu)$ 为岩石中应力波衰减指数， μ 为岩石的泊松比，冲击波作用区取“+”，应力波作用区取“-”，而光面爆破不耦合装药的主要目的之一就是消除岩石中的冲击波作用，因此取“-”； p_r 为爆生气体膨胀撞击孔壁在孔壁岩面上产生的初始压力，其与爆生气体充满炮孔时的准静压力 p_a 有着本质的区别，前者在岩石中产生动态应力场，后者则在岩石中产生静态应力场， p_r 值^[10]为

$$p_r = \frac{n \rho_0 D^2 K_d^{-6}}{8 K_1} = \frac{n p_0 K_d^{-6}}{K_1} \quad (15)$$

式中： n 为爆生气体撞击孔壁时的压力增大倍数，通常取 $n = 8$ 。由此有

$$E = r_b \left(\frac{\beta n p_0 K_d^{-6}}{S_t K_1} \right)^{\frac{1}{\alpha}} + r_b \left(\frac{p_a}{S_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

因此，在确定空气垫层光面爆破装药轴向不耦合系数时，以上 3 个要求都是必须满足的，实际上满足了第 3 个要求，即能满足第 2 个要求。应用时先依据第 1 个要求确定一合理的轴向不耦合系数(所选 K_1 稍大于要求值即可，这样可保证炮孔内有足够的气体压力以形成较长的爆生裂缝)，再依据第 3 个要求求算此装药结构条件下的合理炮孔间距。

4 计算实例

以空气软垫层为例计算光面爆破装药结构参数。选用 2# 岩石硝铵炸药, 密度 $\rho_0 = 1.0 \text{ g/cm}^3$, 炸药爆速 $D = 3\ 600 \text{ m/s}$, 炮孔装药直径 $d_c = 32 \text{ mm}$, 炮孔直径 $d_b = 40 \text{ mm}$ 。其他计算参数选定为: $p_k = 200 \text{ MPa}$, $K_0 = 2$ 。依据第 1 个要求求得的炮孔装药光面爆破时轴向不耦合系数 K_1 列于表 1^[12]中。

由表 1 可见, 光面爆破炮孔采用空气垫层装药结构, 在炸药条件相同时, 为保证孔壁岩石不发生压缩性破坏, 抗压强度越低的岩石, 轴向不耦合系数的取值越大。

5 工程应用

淮南花家湖矿竖井基岩掘进穿过寒武系片麻岩段光面爆破时采用了轴向空气垫层装药结构。井筒掘进直径 6.8 m, 此段片麻岩主要是混合片麻岩、花岗片麻岩、角闪片麻岩和混合花岗岩等, 岩层总厚度 134.5 m, 实测其部分物理力学性能见表 2。

选用 YT-27 型风动凿岩机, 十字型合金钎头, 炮孔直径 $d_b = 42 \text{ mm}$, 炮孔长度 $L_b = 2.0 \text{ m}$, 岩石水胶炸药密度 $\rho_0 = 1.2 \text{ g/cm}^3$, 炸药爆速 $D = 4\ 500 \text{ m/s}$, 药卷规格为 $\phi 35 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 480 \text{ g}$; 第 1~6 段 100 ms 延期电磁雷管, 装药连线不停电, 作业时间短,

安全可靠。

根据所实测的岩石条件, 选用不同的装药集中度 $q_1 = 200 \sim 350 \text{ g/m}$, 抗拉强度大的岩石取较大值。运用上面分析要求推得的理论计算公式求解出轴向不耦合系数 K_1 , 再据此求算炮孔间距 E , 计算结果列入表 2 中。

为便于施工, 在整个片麻岩段选用的炮孔布置参数基本一致, 但装药参数却根据不同的岩石条件而改变(包括周边光爆炮孔), 整体爆破效果良好, 平均炮眼利用率达 88%以上, 并帮无明显的超欠挖现象, 周边光面爆破成型质量高。由此也证明了对岩石光面爆破空气垫层装药结构参数分析的合理性及计算结果的可行性。

6 结 语

岩石光面爆破时, 光面爆破炮孔采用空气垫层装药结构, 一方面减少了爆炸压力对孔壁岩石的破坏, 另一方面又延长了爆生气体准静压力的作用时间, 因而能够获得较为理想的光面爆破效果。在确定装药轴向不耦合系数和光面爆破炮孔间距时, 要以不造成孔壁岩石压缩性破坏和保证炮孔连心线方向孔壁起裂以及孔间贯通裂缝完全形成作为条件, 根据岩石情况通过调整以求得两者的最好组合。对于 $d_b = 40 \text{ mm}$ 左右的小直径炮孔, 一般轴向不耦合系数 K_1 取 3.0~6.0, 光爆炮孔间距 E 取 500~700 mm 为宜。

表 1 4 种岩石炮孔装药光面爆破时的轴向不耦合系数计算值

Table 1 Axial decoupling coefficient calculation values of smooth blasting in some rocks

岩石名称	密度/kg · m ⁻³	应力波波速/m · s ⁻¹	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	轴向不耦合系数 K ₁
和泉砂岩	2 600	3 700~4 300	100~140 (120)	8~9	> 1.89
多湖砂岩	2 000	1 800~3 500	15~25 (20)	2~3	> 4.96
大理岩	2 700	4 500~6 000	90~110 (100)	5~9	> 2.17
群妈砂岩	2 700	4 100~5 700	200~240 (220)	10~23	> 1.20

注: 括号中数据为计算用值。

表 2 岩石的物理力学性能和轴向不耦合系数

Table 2 Physics mechanics properties of rocks and calculation coefficient of axial decoupling

岩石名称	密度 / kg · m ⁻³	泊松比	抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	轴向不耦合系数 K ₁		单孔药量 / 卷	装药集中度 / g · m ⁻¹	炮孔间距/mm	
					计算值	使用值			计算值	使用值
混合片麻岩	2 728	0.33	80.5	6.8	> 3.42	5.00	1.0	230	546	650
角闪片麻岩	2 710	0.32	71.5	6.4	> 3.73	5.00	1.0	230	533	650
混合花岗岩	2 650	0.26	157.4	9.4	> 2.07	3.33	1.5	345	430	550

参考文献(References) :

- [1] 宗琦. 软岩巷道光面爆破技术的研究与应用[J]. 煤炭学报, 2002, 27(1): 45-49.(Zong Qi. Study and application of soft rock tunnel smooth blasting technology[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(1): 45-49.(in Chinese))
- [2] 肖正学, 张志呈, 郭学彬. 断裂控制爆破裂纹发展规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 546-549.(Xiao Zhengxue, Zhang Zhicheng, Guo Xuebin. Study on fracture control blasting crack developing law[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 546-549.(in Chinese))
- [3] 林大泽, 张建华, 黄风雷. 复杂地质条件下光面爆破间断不耦合装药结构的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9(4): 41-43.(Lin Daze, Zhang Jianhua, Huang Fenglei. Test study on smooth blasting discontinuous decouple charge structure under complex geological condition[J]. China Safety Science Journal, 1999, 9(4): 41-43.(in Chinese))
- [4] 杨小林, 员小有, 梁为民. 不耦合装药爆炸作用机理及试验研究[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 130-134.(Yang Xiaolin, Yuan Xiaoyou, Liang Weimin. Effect mechanics and test study of decouple charge explosion[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(2): 130-134.(in Chinese))
- [5] 宗琦, 孟德君. 炮孔不同装药结构对爆破能量影响的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 641-645.(Zong Qi, Meng Dejun. Theoretical study on influence of hole with different charge structure to blasting engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 641-645.(in Chinese))
- [6] 陈跃达. 空气间隔装药对爆破效果的影响[J]. 北京矿冶研究总院学报, 1993, (4): 8-13.(Chen Yueda. The influence of air discontinuous charge to blasting effect[J]. Journal of Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, 1993, (4): 8-13.(in Chinese))
- [7] Fu J G, Qin W S, Li Y R. Experimental study of regularity of effect of bottom air column length on cut blasting[A]. In: Theory and Practice of Energetic Materials[C]. Beijing: Science Press, 2003. 1 059-1 062.
- [8] 高尔新, 杨仁树. 爆破工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.(Gao Erxin, Yang Renshu. Blasting Engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.(in Chinese))
- [9] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆: 重庆出版社, 2000. 17-18.(Zhang Zhicheng. Controlled Blasting with Directional Fracturing[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 2000. 17-18.(in Chinese))
- [10] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.(Wang Wenlong. Hole Blasting[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1989.(in Chinese))
- [11] 高金石, 杨军. 准静压力作用下岩体爆破成缝方向和机理的研究[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(1): 76-83.(Gao Jinshi, Yang Jun. Study on rock blasting crack development direction and mechanics under simu-static pressure effects[J]. Explosion and Shock Waves, 1990, 10(1): 76-83.(in Chinese))
- [12] 刘殿中. 工程爆破实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.(Liu Dianzhong. Application Manual of Engineering Blasting[M]. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1999.(in Chinese))