空气垫层装药爆破过程中爆炸应力场衰减规律的初步探讨

颜事龙^{1,2}, 徐颖², 宗琦², 傅菊根²

(1. 安徽理工大学 化学工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘要:利用爆炸力学理论,得到空气垫层装药爆破的孔壁压力及其爆炸应力场.首次提出了爆生气体二阶段膨胀理论的临界不耦合系数的计算方法,得出了随不耦合系数的增大,应力峰值迅速降低;装药段的应力峰值进区较垫层段大,但远区则相近;无论是径向还是切向,岩石内首先出现的均是压应力,而后转变为压应力.

关键词:空气垫层装药;爆炸应力场;临界不耦合系数

中图分类号:TD235.4 文献标识码:A

Preliminary Probe into the Attenuation Law of Blast Stress Field Created in the Course of Detonation with Air Cushion Charging Construction

YAN Shi-long^{1,2}, XU Ying², ZONG Qi², FU Ju-gen²

(1. School of Chemical Engineering, Anhui university of science and technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. The key laboratory of safe and high efficient exploitation in coalmine set up by ministry of education together with province, Huainan, Anhui 232001, China)

Abstract: Based upon blasting mechanics theory, pressure on the wall of borehole and blast stress field are gained in the course of detonation with air cushion charging construction. For the first of time, the two-phase explosive gas expansion theory and the computing method of critical decoupling coefficient are presented. The peak value of stress rapidly reduces following the increment of decoupling coefficient. The peak value of stress in near zone is bigger than that in the cushion sect, and close in far zone. Compressive stress appears first, radially and tangentially alike, in the rock, then it becomes tensile stress.

Key words: air cushion charging; blast stress field; critical decoupling coefficient

收稿日期:2008-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774002);高等学校博士点基金资助项目(200803610002);安徽省高校创新团队支持计划基金资助项目(TD200705);安徽省自然科学基金资助项目(070414167).

作者简介:颜事龙(1959-),男,安徽淮南人,安徽理工大学教授,博士,博导.主要研究方向:爆破器材、现代工程爆破技术.

0 引言

空气垫层装药结构在光面爆破中广泛应用,分析表明,采用空气垫层装药结构能够获得较好的光面爆破效果,是一种较为理想的光爆装药形式,这已被实践所证明。炮孔装药爆轰后,高温、高压的爆生气体迅速膨胀,首先压缩空气垫层,在空气垫层中激起冲击波并沿炮孔轴向传播。空气垫层轴向压缩的同时,必将产生侧向扩张,对孔壁产生径向扩张压力。由于空气垫层介质的波阻抗值相对岩石要小,因此爆炸冲击波在空气垫层中得到了缓冲,压力降低,从而消除或减少了孔壁岩石的压缩性破碎;再者软垫层的存在延长了爆生气体在炮孔中的膨胀时间,即延长了爆生气体准静压力的作用时间,为炮孔间贯通裂缝的充分形成创造了有利条件。光面爆破要达到预期的光爆效果,必须控制装药爆炸后在岩石内产生的应力场,太小则不能爆落原岩,太大则破坏了围岩的稳定性,失去了光爆的意义。基于此,本文对空气垫层装药爆破的爆炸应力场进行研究。

1 空气软垫层装药的孔壁压力

依据热力学原理,爆生气体在炮孔中发生等熵绝热膨胀。有些研究认为,对爆轰产物的膨胀过程应按两阶段等熵绝热膨胀考虑^[1],对于一般中威力工业炸药,两阶段的分界点处的临界压力 $P_K = 200$ MPa。当空气冲击波的人射压力 $P_1 \geq P_K$ 时,按 $k = 3$ 等熵膨胀计算;当 $P_1 < P_K$ 时,按 $\gamma = 1.3$ 绝热膨胀计算^[2]。

当其膨胀压力 $P_1 \geq P_K$ 时,压力变化遵循如下规律^[3]:

$$P = P_E \left(\frac{V_c}{V_1} \right)^3 \quad (1)$$

而当 $P_1 < P_K$ 时,压力变化遵循如下规律:

$$P = P_K \left(\frac{P_E}{P_K} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{V_c}{V_1} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2)$$

式中: V_c 为炮孔装药体积, $V_c = \pi d_c^2 L_c / 4$; 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; P_E 为爆生气体平均压力, $P_E = \frac{1}{8} \rho_c D_v^2$; ρ_c 为炸药的密度; D_v 为炸药的爆速。

因为空气具有极强的可压缩性,所以,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。

以轴向不耦合系数 $K_L (K_L = L_b / L_c)$ 代入式(1)和式(2),可得爆生气体膨胀充满整个炮孔时的压力为:

$$\text{当 } P \geq P_K \text{ 时, } P_S = P_E K_L^3 \quad (3)$$

$$\text{而当 } P_1 < P_K \text{ 时, } P_S = K_L^{-4/3} P_K (P_E / P_K)^{4/3} \quad (4)$$

在求得了 P_S 后,容易得到空气垫层装药孔壁径向压力为^[4]:

$$P_r = n \cdot P_S \quad (5)$$

而孔壁切向压力为:

$$P_\theta = \lambda n \cdot P_S \quad (6)$$

式中: n 为压力增大系数,根据 K. K. 安德列夫和 A. Ф. 别辽耶夫的研究,计算时可取 $n = 8 \sim 11$; λ 为侧压系数,可近似取 $\lambda = \mu / (1 - \mu)$, μ 为岩石的泊松比。

2 空气软垫层装药的临界不耦合系数

具体空气软垫层装药的临界不耦合系数目前的文献还没有提及,有待进一步研究。由于缺乏具体的试验数据,用理论来推导临界不耦合系数如下。

当膨胀压力大于等于临界压力时,爆生气体是按 $\kappa = 3$ 的规律膨胀的,即:

$$P_E V_c^3 = P_K V_K^3 \quad (7)$$

式中: $V_c = \pi d_c^2 L_{ck} / 4$ 为炮孔装药体积, d_c 为炮孔装药直径, $V_K = \pi d_c^2 (L_{ck} + L_a) / 4$ 为爆生气体膨胀到临界压力 P_K 时所占体积, L_{ck} 为临界装药长度, L_a 为空气垫层长度。

将上式变形,有:

$$\frac{P_E}{P_K} = \left(\frac{V_K}{V_c} \right)^3 = \left(\frac{L_{ck} + L_a}{L_{ck}} \right)^3 = K_M^3 \quad (8)$$

式中, K_M 为临界耦合系数。

由上式易得临界不耦合系数:

$$K_M = \sqrt[3]{P_E / P_K} \quad (9)$$

由式(9)知,只要确定了临界压力 P_K , 就可以求得相应装药的临界不耦合系数。 P_K 对一般炸药可取 200 MPa。

炸药采用 DDNP, 密度 $\rho_c = 1.0$ g/cm³, 爆速 $D_v = 4500$ m/s, 其临界不耦合系数 $K_M = 2.32$, 岩石介质参数经实测得具体参数见表 1。计算时采用固定装药直径为 6 mm, 通过改变装药长度来改变不耦合系数。

将表 1 中有关参数代入式(5)或者式(6)中, 计算时 n 取 8。可得空气垫层装药时孔壁压力的

计算结果见表2.

表1 岩石材料模型力学性质参数
Table 1 Physical mechanical parameters of rock material model

密度 /(g·cm ⁻³)	纵波波速 /(m·s ⁻¹)	横波波速 /(m·s ⁻¹)	弹性模量 /GPa	泊松比	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
2.0	3 788	2 086	24.7	0.23	28.86	1.6

表2 空气垫层装药孔壁压力计算结果
Table 2 Calculation results of pressure of wall of hole for air axial blanket charge

轴向不耦合系数(K _L)		1.67	2.0	2.33	2.67
孔壁压力/MPa	径向	4 348	2 531	1 600	1 334
	切向	1 304	759	480	400

由表2可见,不耦合系数是影响孔壁压力的一个重要因素,随不耦合系数的增大,孔壁压力迅速降低.

3 爆炸应力场的衰减规律

爆炸应力场在岩体内的衰减规律目前通用的是按指数规律衰减的公式^[5]:

$$P = P_b \bar{r}^{-\alpha} \quad (10)$$

式中, P_b 为炮孔壁初始冲击压力; $\bar{r}$ 为对比距离, $\bar{r} = r/r_b$, r 为距炮眼中心距离, r_b 为炮眼半径; α 为衰减指数,对冲击波 $\alpha \approx 3$; 对应力波而言,日本学

者熊尾日野认为 $\alpha = 1 \sim 2$, 对于大多数岩石 $\alpha \approx 1.5$, 苏联学者 A. H 哈努卡耶夫认为 $\alpha = 2 - \mu / (1 - \mu)$, 式中 μ 为岩体的泊松比.

综合目前的研究成果,爆炸冲击波的作用范围一般在距爆源中心3~7倍装药半径范围内,爆炸应力波场的作用范围一般在距爆源中心120~150倍装药半径范围内^[6].

将表中数据代入式(2),以 $K_L = 2.0$ 为例,取 $\alpha = 1.5$, 分别取对比距离5, 10, 15, 20, 25 可计算得对应岩石处的应力峰值,如下表3所示.

表3 应力峰值计算结果
Table 3 Calculation results of stress

对比距离 $\bar{r}$		5	10	15	20	25
计算点处应力峰值	径向	226.38	80.04	43.62	28.30	20.25
	切向	67.91	24.01	13.09	8.49	6.07

4 结论

本文通过对空气垫层装药的理论分析,得到以下结论:

1) 空气垫层装药时,装药段的应力峰值在近区远远大于垫层段岩石内的峰值,但随距装药中心距离的增大,二者差值减小,到远区则相近.

2) 不论是径向还是切向应力,首先出现的都是压应力,而后衰减为拉应力;在近区压应力大于拉应力,但远区则相反,拉应力大于压应力.

3) 装药不耦合系数是岩石内爆炸应力场的一个重要影响因素,随不耦合系数的增大,应力峰值迅速降低.

参考文献:

[1] 费鸿禄. 光面爆破装药不耦合系数的计算[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(3): 270-273.
 [2] 宗琦. 炮孔水耦合装药爆破应力分布特性试验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(3): 393-397.
 [3] 高金石, 张奇. 爆破理论与爆破优化[M]. 西安: 西安地图出版社, 1993.
 [4] 徐颖, 宗琦. 地下工程爆破理论及应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
 [5] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
 [6] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆: 重庆出版社, 2000.