

预裂和光面爆破炮孔间距的计算与比较

西安矿业学院 张 奇

关于预裂和光面爆破炮孔间距已有不少计算方法,但对两者爆破物理过程差别分析与比较缺少研究。因此,不少计算方法往往把两者混为一体,给出同样结论,与实际工程不符。实践证明,在同样的装药条件下,光面爆破和预裂爆破的炮孔间距是不同的。

预裂爆破与光面爆破既有相同之处,又存在区别,其区别就在于自由面在爆破中的作用。

一、预裂炮孔间距的计算

周边孔一般采用同时起爆,但目前瞬发雷管的飘移时间在毫秒量级。因此,相邻两孔实际的起爆过程可分为两种情况:一种是1孔起爆后产生的应力波到达2孔时,2孔已经起爆,1孔和2孔发生的应力波在两孔中部的某点相遇;另一种情况是,1孔先爆,其爆炸应力波通过2孔以后,2孔后爆(参见图1)。

柱形装药爆炸应力波在岩体内的衰减可由下式确定:

$$\sigma_r = \sigma_0 / \bar{r}^\alpha \quad (1)$$

$$\bar{r} = r/a$$

式中 σ_r ——岩体内某点的径向应力峰值;
 r ——该点到炮孔中心的距离;
 a ——炮孔半径;
 α ——应力衰减指数,一般为1.2~1.8;
 σ_0 ——孔壁压力。

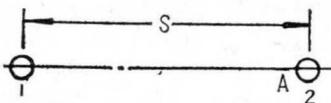


图1 相邻孔起爆时差分析

对于上述相邻孔起爆过程的第一种情况,1孔和2孔发生的应力波在两孔中部相遇,相

遇处的径向应力为

$$\sigma_r' = \frac{\sigma_0}{r^\alpha} + \frac{\sigma_0 a^\alpha}{(s-r)^\alpha} \quad (2)$$

式中 s ——炮孔间距。

对于柱形装药,一般认为径向应力峰值是环向拉应力的2倍,因此,数值上有

$$\sigma_\theta' = \frac{1}{2} \sigma_r' \quad (3)$$

式中 σ_θ' ——应力波相遇处的环向应力。

将(3)式代入(2)式后得

$$\sigma_\theta' = \frac{1}{2} \frac{\sigma_0 a^\alpha}{r^\alpha} \left[1 + \frac{1}{\left(\frac{s}{r} - 1\right)^\alpha} \right] \quad (4)$$

由上式看出,应力波在不同位置相遇,其环向应力是不同的,那么要形成贯通裂缝,必须保证在任何位置上都有

$$\sigma_\theta' \geq [\sigma] \quad (5)$$

式中 $[\sigma]$ ——岩石的单向抗拉强度。

根据(4)式可以求出 σ_θ' 的最小值及其所在位置。

由(4)式得

$$\frac{d\sigma_\theta'}{dr} = -\frac{\sigma_0 a^\alpha \alpha}{2} [r^{-(\alpha+1)} - (s-r)^{-(\alpha+1)}]$$

令 $\frac{d\sigma_\theta'}{dr} = 0$ 得到

$$r = s/2$$

即在应力波于炮孔间距的1/2处相遇时,迭加的环向应力为最小。根据(5)式应有

$$(\sigma_\theta')_{\min} = \frac{\sigma_0 a^\alpha}{(s/2)^\alpha} \geq [\sigma] \quad (6)$$

炮孔间距为

$$s \leq 2a \left(\frac{\sigma_0}{[\sigma]} \right)^{1/\alpha} \quad (7)$$

应力波在两孔中间相遇，实际是两孔绝对同时起爆。但是(6)式和(7)式说明，即使两孔为非同时起爆，只要起爆时差 $\Delta\tau \leq s/C_p$ ，按(7)式确定的炮孔间距就可以保证贯通裂缝的形成。或者说(7)式并不仅适用于两孔绝对同时起爆，只要起爆时差 $\Delta\tau \leq s/C_p$ ，炮孔间距就应按(7)式计算。其中 C_p 为岩体介质内的 P 波波速。

如果1孔和2孔的起爆时差 $\Delta\tau > s/C_p$ ，即1孔发出的应力波到达2孔时，2孔尚未起爆。这时，2孔对于1孔的应力波来说，相当于空孔，应力波在空孔周围将产生应力集中。

1孔的应力波到达2孔时，其径向应力变为

$$\sigma_r = \frac{\sigma_0 a^2}{s^2} \quad (8)$$

在2孔的A点产生应力集中，A点的切向拉应力在数值上为

$$(\sigma_\theta)_A = n \cdot \frac{\sigma_0 a^2}{s^2} \quad (9)$$

根据弹性理论和实践结果， $n=2\sim 3$ 称为应力集中系数。如果在A点形成径向裂缝，应力

$$(\sigma_\theta)_A = [\sigma] \quad (10)$$

将(9)式代入(10)式，整理后得

$$s = a \cdot \left(\frac{\sigma_0}{[\sigma]} \cdot n \right)^{1/2} \quad (11)$$

比较(7)和(11)式可知，如果按两孔起爆时差 $\Delta\tau > s/c_p$ 计算炮孔间距，无论两孔实际的起爆时差如何，均可保证贯通裂缝的形成。按(11)式得到的炮孔间距小于按(7)式得到的炮孔间距，因此，按(11)式计算炮孔间距更为合理。同时根据这一分析可知，提高雷管的起爆精度，缩短飘移时差对于节省爆炸能量，减少钻孔工作量具有一定意义。

满足(10)式说明，1孔的爆炸应力波在2孔的A点处可以形成径向裂缝，但这一径向裂缝能否贯通还取决于2孔的爆炸作用。如果使A点的径向裂缝扩展，应有下式成立

$$P_C = K_{IC} / 2.24 \sqrt{\pi l} \quad (12)$$

式中 P_C ——孔壁临界压力；
 K_{IC} ——张开型应力强度因子；

l ——裂缝长度。

随着裂缝的不断扩展，所需的孔壁临界压力也逐渐减小，在裂缝扩展的每一时刻都应有 $\sigma_0(t) > P_C(t)$ (13)

裂缝扩展不仅与应力波峰值有关，还与应力波的波形有关。不偶合装药产生的爆炸应力波近似为矩形，因此，如果应力峰值能保证近区径向裂缝扩展，那么就一定能保证裂缝的贯通。根据(12)式计算可知，应力峰值可以保证近区径向裂缝扩展。除了应力峰值外，孔壁压力还必须具有一定的作用时间才能使裂缝贯通。

裂缝贯通所需要的时间可以近似表示为

$$t = S/D \quad (14)$$

式中 D 为裂缝传播的平均速度， $D=400\sim 1000m/s$ 。如果取 $s=0.5m$ ， $D=400m/s$ ，则

$$t = 1.3ms \quad (15)$$

炮孔直径为32~50mm左右的不偶合装药，其爆炸的作用时间可达几十毫秒以上，可见孔壁压力的作用时间是满足裂缝贯通要求的。

对于一般岩石^[1]， $K_{IC}=0.046\sim 3.91MN/m^{3/2}$ ，花岗岩 $K_{IC}=2MN/m^{3/2}$ ，取 $s=0.5m$ ，则贯通裂缝时需要的炮孔压力值为

$$P_C = 0.7MN/m^2 \quad (16)$$

可见，如果1孔爆炸作用能够在2孔的A点形成径向裂缝，那么2孔的爆炸作用一定能够使径向裂缝扩展直至贯通。

根据上述，在目前瞬发雷管飘移时差处于毫秒量级的条件下，应该以(11)式作为预裂爆破炮孔间距的计算公式。

二、光面爆破的炮孔间距

光面爆破与预裂爆破的区别仅在于爆破过程中的自由面条件不同。在光面爆破中，除了1孔发出的应力波直接达到2孔产生应力集中外，1孔发出的应力波经自由面反射到达2孔后也产生应力集中(如图2)。根据弹性理论，直达波在2孔A点产生的应力集中由(9)式确定。反射波到达2孔在A点产生的应力集中由下式计算。

$$\sigma_R' = \sigma_A' (1 - 2\cos 2\theta) \quad (17)$$

式中 σ_R' 是反射波到达2孔的拉应力(如图

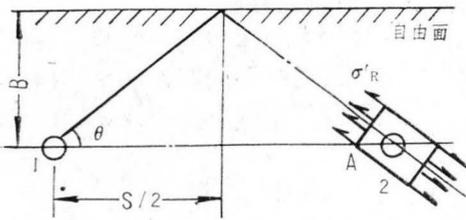


图 2 反射波在2孔产生应力集中

2), 由应力波在岩体内的传播规律和反射特性可得

$$\sigma_{R'} = R \cdot \frac{\sigma_0 a^\alpha}{(2B/\sin\theta)^\alpha} \quad (18)$$

其中R为反射系数。

$$R = -\frac{\operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}^2 2\beta - \operatorname{tg}(90^\circ - \theta)}{\operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}^2 2\beta + \operatorname{tg}(90^\circ - \theta)} \quad (19)$$

式中 β, θ 意义如图3。B为炮孔最小抵抗线。

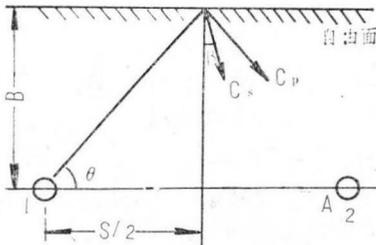


图 3 反射波及符号意义

因此, 在2孔A点上的拉应力为

$$(\sigma_\theta)_A = n \cdot \frac{\sigma_0 a^\alpha}{s^\alpha} + R \cdot \frac{\sigma_0 a^\alpha (1 - 2\cos 2\theta)}{(2B/\sin\theta)^\alpha} \quad (20)$$

因 $B/\sin\theta = \sqrt{B^2 + (S/2)^2}$, 代入(20)式后可得

$$(\sigma_\theta)_A = \frac{\sigma_0 a^\alpha}{s^\alpha} \left[n + \frac{R(1 - 2\cos 2\theta)}{(\sqrt{(2B/S)^2 + 1})^\alpha} \right]$$

令 $(\sigma_\theta)_A = [\sigma]$ 有

$$[\sigma] = \frac{\sigma_0 a^\alpha}{s^\alpha} \left[n + \frac{R(1 - 2\cos 2\theta)}{(\sqrt{(2B/S)^2 + 1})^\alpha} \right] \quad (21)$$

其中 S/B 称为邻近系数, 用K来表示, 代入(21)式得

$$[\sigma] = \frac{\sigma_0 a^\alpha}{S^\alpha} \left[n + \frac{R(1 - 2\cos 2\theta)}{(\sqrt{(2/K)^2 + 1})^\alpha} \right]$$

最后得

$$S = a \cdot \left\{ \frac{\sigma_0}{[\sigma]} \left[n + \frac{R(1 - 2\cos 2\theta)}{(\sqrt{(2/K)^2 + 1})^\alpha} \right] \right\}^{1/\alpha} \quad (22)$$

由上式看出, 光面爆破的炮孔间距不仅与岩石性质、炮孔半径有关, 而且还取决于邻近系数。在预裂爆破中K趋于零, 则(22)式变为

$$S = a \cdot \left(\frac{\sigma_0}{[\sigma]} \cdot n \right)^{1/\alpha}$$

上式与(11)式相同, 因此预裂爆破可以认为是光面爆破中的一种特殊情况。

在光爆炮孔间距计算中, 反射系数R与 β 有关, β 由下式计算

$$\frac{\cos\theta}{\sin\beta} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \quad (23)$$

式中 μ 为岩体的泊桑比。

三、预裂和光面爆破炮孔间距的比较

由(11)式和(22)式可知, 在同样岩体内和同样装药条件下, 光面爆破的炮孔间距应大于预裂爆破的炮孔间距。光面爆破与预裂爆破炮孔间距的相对比为

$$\frac{S_S}{S_P} = \left[1 + \frac{R(1 - 2\cos 2\theta)}{n(\sqrt{(2/K)^2 + 1})^\alpha} \right]^{1/\alpha} \quad (24)$$

式中 S_S 和 S_P 分别表示光面和预裂爆破的炮孔间距。取 $K=1, \mu=0.25, \alpha=1.5, n=2.5$, 则

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1}(2B/S) = 63^\circ$$

由式(23)得

$$\sin\beta = \frac{\cos 63^\circ}{\sqrt{3}} = 0.26$$

所以 $\beta = 15^\circ$

由(19)式得 $R = 0.8$

由(24)式得

$$\frac{S_S}{S_P} = \left[1 + \frac{0.8(1 - 2\cos 126^\circ)}{2.5 \times (\sqrt{5})^{1.5}} \right]^{1.5} \approx 1.12$$

即光面爆破的炮孔间距比预裂爆破的炮孔间距大12%。

按 $K=1$ 考虑, 不难由(24)式计算得到在同样的装药和岩体条件下, 光面爆破比预裂爆破的炮孔间距大10~20%, 这在实践中已得到证明。

四、结 语

1. 由于目前瞬发雷管起爆飘移时差较大，因此，预裂爆破的孔间距须按(11)式计算。按(7)式计算不能保证裂缝贯通。按(11)式计算的孔间距可以保证两孔以任何时差起爆

的条件下形成贯通裂缝。

2. 在同样的岩体和同样的装药条件下，光面爆破比预裂爆破孔间距大10~20%，增大的程度取决于邻近系数和应力波在岩体内的衰减指数。

参考资料(略)

提高老岭采场上盘最终边坡角的探讨

鞍钢矿山公司设计院 易永冰

老岭采场为鞍钢弓长岭铁矿岭东露天矿主要采场之一。该采场原设计生产能力为年产磁铁铁矿石80万t，采剥总量为330万t。按此设计到1986年末，境界内应结存347万t矿石，730万t岩石，实际结存矿石量与原设计基本接近，但岩石量为988万t，少剥岩石258万t。由于剥岩落后，势必造成今后几年大量剥岩，每年欲采出80万t矿石，生产剥采比要超过3.5t/t以上，致使采矿无效益可得。面对采场目前实际生产情况，1986和1987连续两年矿石产量安排已由80万t降到70万t，生产剥采比已超过3t/t。如何扭转采场被动局面，降低剥采比，提高经济效益，并合理延长老岭采场的稳产时间，乃是本文所要阐述的中心问题。

通过对老岭露天采场延深开采方案的可行性研究，采取了有效的措施，由原来设计的上盘41°边坡角提高到55°，把原设计的上盘回返公路布线方式改为螺旋布线方式，并将横向陡帮开采工艺，同加陡采场上盘边坡角结合起来，解决了上述问题。

一、概 况

矿区出露地表为前震旦系“鞍山群”变质岩系。矿体走向北东40°~50°，倾向南东，倾角20°~60°，上陡下缓。矿体走向最大长度1300m，出露地表长800m，厚12~50m。矿体呈层状，赋存于鞍山群变质岩系中，以贫铁矿为主，平均品位为30.8%。矿石体重为3.35t/m³，

硬度系数 $f=12\sim 16$ ；岩石体重为2.7t/m³，硬度系数 $f=6\sim 12$ 。矿体上盘为混合岩，下盘为石榴云母石英片岩。矿体构造复杂，褶曲断裂较发育。

该采场于1968年进行小规模露天开采，到1973年编制了年产磁铁铁矿石80万t规模的总体规划设计。1976年编制了初步设计，并以此设计进行建设。1982年后在开采工艺上，由原设计的纵向推进方式改为陡帮横向推进，至1986年末已采出矿石1250万t。

老岭采场原设计长800m、宽470m，地表封闭圈为256m，山坡露天高114m，凹部露天深24m。采用上盘回返公路开拓方式，矿石由232m露天底经上盘244m和268m平台两次回返后，运往采场东端倒装场翻卸，然后再由铁路转运到弓长岭选矿厂。岩石则运往采场西部的茨沟排土场舍弃，如图1。

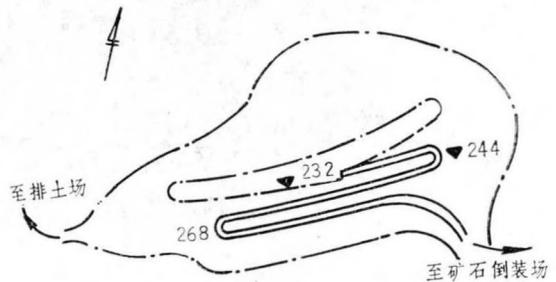


图 1 原设计开拓运输系统