

层状岩体光面爆破效果的理论分析

张 奇

(西安矿业学院)

摘要 文献〔1、2〕指出,在层状岩体内进行光面爆破时,效果难以保证。本文根据光面爆破机理和应力分析,阐述了结构面对光面爆破效果的影响。通过理论分析指出当结构面与断裂控制面夹角为 25° — 35° 时,光面爆破效果最难保证;当结构面与断裂控制面夹角为 60° — 90° 时,对光面爆破效果无影响。与文献〔1、2〕的实验结果相吻合。

关键词 光面爆破;工程爆破。

1. 引言

岩体内各种结构面对光面爆破效果具有重要影响。文献〔1〕通过实验指出,当结构面与断裂控制面夹角小于 60° 时,光面爆破效果难以保证。Hagan等人^{〔2〕}根据实践经验指出,结构面与断裂控制面夹角在 25° — 40° 时,预呈“之”字形路径,部分沿片理,部分横切构造。McKown进一步提出,当结构面与断裂控制面夹角为 20° — 30° 时,为了得到良好的光面爆破效果,必须采取一定的技术措施,减小炮孔间距和装药量。

由于结构面发育,岩体内光面爆破技术目前还存在一定问题,因此有必要从本质上认识结构面对光面爆破效果的影响,从而为光面爆破施工提供参考。

本文根据光面爆破机理,应力分析以及岩石的破坏准则,分析结构面对光面爆破效果的影响。

2 结构面方位的影响

在光面爆破过程中,装药爆炸以后沿相邻两孔连心线方向形成贯通裂缝。如果在两孔中部存在结构面,那么贯通裂缝的形成将受到影响。

结构面与断裂控制面可能以各种方式相交,本文假设两者相交的交线与连心线垂直。如图1,在相邻两孔连心线上结构面与断裂控制面相交处取一单元体。断裂控制面与结构面的法线方向的夹角为 α 。

装药爆炸以后,单元体的应力状态如图2。由于结构面与岩石(不包括结构面)的力学性质不同,因此单元体的破坏方式可能有三种情况:1、沿 X 轴方向拉伸断裂,这是光面爆破所希望的断裂形式;2、沿结构面方向破裂。由于结构面上一般既有正应力又有剪应力,因此按莫尔-库仑强度理论,其破坏形式通常为剪切破裂。如果沿结构面发生剪切破坏,光面爆破效果将受到影响,甚至光面爆破失败;3、沿 X 轴方向拉伸断裂和沿结构面方向剪切破裂同时发生,如果是这样,即使能够形成控制断裂面,围岩的稳定性也将受到影响。

根据应力分析,结构面上的正应力和剪应力为

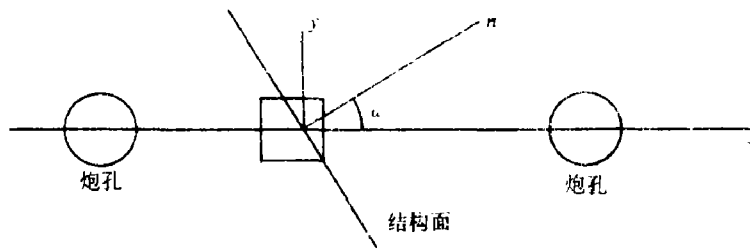


图1 结构面与断裂控制面的关系

$$\sigma_a = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2a \quad (1)$$

$$\tau_a = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2a \quad (2)$$

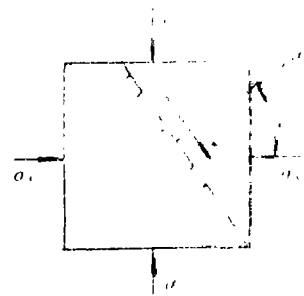


图2 单元体的应力状态

式中 σ_a 、 τ_a 分别为结构面上的正应力和剪应力； σ_x 、 σ_y 分别是单元体x轴、y轴方向的正应力。

如果要在层状岩体中得到理想的光面爆破效果，仅允许单元体沿x轴方向发生拉伸断裂，而不允许沿结构面方向断裂破坏。因此，根据岩石最大拉应力破坏准则和莫尔-库仑破坏准则，并有

$$-\sigma_y \gg [\sigma] \quad (3)$$

$$|\tau_a| < \sigma_a \text{tg}\varphi + C \quad (4)$$

式中 $[\sigma]$ 是岩石(不包括结构面)的动态单向抗拉强度。根据文献[3]，岩石动态单向抗拉强度近似等于静态单向抗拉强度； φ 为结构面的内摩擦角； C 为结构面的粘结力。

将式(1)、式(2)代入(4)式有

$$\left| \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2a \right| < \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2a \right) \text{tg}\varphi + C \quad (5)$$

装药爆炸以后，岩体内产生的应力波以炮孔为中心呈放射状发展。应力波的幅值随时间而变化，其环向最大应力幅值为拉，径向最大应力幅值为压。数值上环向应力最大幅值近似为径向应力最大幅值的一半^[3,4,5]，因此，根据在相邻两孔的连心线上的任一点都有

$$\sigma_y = -\sigma_x / 2 \quad (6)$$

再注意到问题的对称性，有 $0 \leq \alpha < 90^\circ$ ，结合(5)式并令

$$f(\alpha) = 3 \sin 2\alpha - (1 + 3 \cos 2\alpha) \text{tg}\varphi \quad (7)$$

可以得到

$$1. \text{ 当 } f(\alpha) = 0 \text{ 时, } -\sigma_y \leq \infty \quad (8)$$

$$2. \text{ 当 } f(\alpha) < 0 \text{ 时, } -\sigma_y > \frac{2C}{3 \sin 2\alpha - (1 + 3 \cos 2\alpha) \text{tg}\varphi} \quad (9)$$

$$3. \text{ 当 } f(\alpha) > 0 \text{ 时, } -\sigma_y \leq \frac{2C}{3 \sin 2\alpha - (1 + 3 \cos 2\alpha) \text{tg}\varphi} \quad (10)$$

在第一种情况下, (8) 式自然成立, 说明当结构面与断裂控制面的夹角满足一定条件时, 结构面对光面爆破效果无任何影响。

在第二种情况下, (9) 式的右端是一个小于零的数, 而不等式左端 $-\sigma_y > 0$ 。因此 (9) 式总能成立。由此可知, 当结构面与断裂控制面夹角满足 $f(a) \leq 0$ 时, 结构面对光面爆破效果无影响。只有在第三种情况下当 $f(a) > 0$ 时, 结构面对光面爆破效果才有影响。因此, 在层状岩体 (层面间距小于炮孔间距) 中进行光面爆破可以得到光滑断壁面的必要条件为

$$\left. \begin{aligned} -\sigma_y &> [\sigma] \\ -\sigma_y &< \frac{2C}{3 \sin 2\alpha - (1 + 3 \cos 2\alpha) \operatorname{tg} \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 $f(a) > 0$ 。

根据上述分析, 结构面对光面爆破效果的影响主要取决于结构面的抗剪参数 (内摩擦角)。由表 1 看出, 一般结构面的内摩擦角在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围内。不妨取 $\varphi = 30^\circ$, 当 $2\alpha = 42^\circ$

表 1 几种结构面的抗剪参数^[6]

结 构 面 类 型	内摩擦角 φ	粘结力 $C(\text{MPa})$
粘土岩层面、页岩层面、泥灰岩层面	$20^\circ \sim 30^\circ$	0.05~0.1
砂岩层面、石灰岩层面、砾岩层面	$30^\circ \sim 40^\circ$	
滑石片岩片理面、云母片岩片理面	$10^\circ \sim 20^\circ$	0~0.05
一般片理面	$20^\circ \sim 30^\circ$	0.05~0.1
光滑破碎面	$30^\circ \sim 40^\circ$	0.05~0.1
粗糙破碎面	$40^\circ \sim 48^\circ$	0.08~0.3
泥化面	$10^\circ \sim 20^\circ$	0~0.05

时 $f(a) = 0$ 。考查 $f(a)$ 可知, 当 $a < a_0$ 时, 有 $f(a) < 0$ (当 $a = a_0$ 时, $f(a) = 0$)。即当 $a < a_0$ 时, 结构面对光面爆破效果无影响。根据上述计算当 $\varphi = 30^\circ$ 时, $a_0 \approx 21^\circ$ 。说明当结构面法线方向与断裂控制面夹角为 $a = 0 \sim 21^\circ$ 时, 结构面强度对光面爆破光滑壁面的形成没有影响。由几何关系可知, 当结构面与断裂控制面的夹角 $a' = 90^\circ - (0 \sim a_0)$ 时, 结构面强度对光面爆破效果无影响。取 $\varphi = 30^\circ$, 有 $a' = 90^\circ - (0 \sim 21^\circ) = 90^\circ \sim 69^\circ$ 。同理, 当 $\varphi = 40^\circ$ 时, $a_0 = 26^\circ$, 相应地有 $a' = 64^\circ \sim 90^\circ$ 。

文献 [1] 的实验结果和文献 [2] 的工程经验曾指出, 当结构面与断裂控制面夹角小于 60° 时, 结构面对光面爆破效果才有不利的影晌。与本文理论分析结果相吻合。

当 $\varphi = 20^\circ$ 时, 可得到 $a_0 = 14^\circ$, 相应地有 $a' = 76^\circ \sim 90^\circ$ 。

由上述三种情况的计算结果可以看出, 结构面的抗剪能力越强 (内摩擦角越大), 结构面与断裂控制面夹角对光面爆破效果的影响范围就越小。当结构面与断裂控制面近于垂直时, 结构面的强度特性对光面爆破效果无影响。

根据 (11) 式, 如果

$$[\sigma] > \frac{2C}{3 \sin 2\alpha - (1 + 3 \cos 2\alpha) \operatorname{tg} \varphi} \quad (12)$$

那么无论怎样采取措施，光面爆破都不能得到理想的光滑壁面。由(12)式可以看出，当 $2C/f(a)$ 时， $2C/f(a)$ 值越小，光面爆破的质量就越难以保证。如果结构面的力学性质一定，将 $f(a)$ 对 a 求导数，经计算当 $a = (90^\circ + \varphi) / 2$ 时， $f(a)$ 取得最大值。令 $g(a) = 2C/f(a)$ ，则有

$$g_{min}(a) = g\left(\frac{90^\circ + \varphi}{2}\right) = \frac{2C}{3\cos\varphi - (1 - 3\sin\varphi)\operatorname{tg}\varphi} \quad (13)$$

表1可看出，各种结构面的内摩擦角 φ 一般的取值范围是 $20^\circ \sim 40^\circ$ 。因此光面爆破效果最难控制的角度 a 为 $a = (90^\circ + \varphi) / 2 = 55^\circ \sim 65^\circ$ 。再根据几何关系，结构面与断裂控制面相应的夹角为 $a' = 90^\circ - a = 35^\circ \sim 25^\circ$ 。即当结构面与断裂控制面的夹角为 $35^\circ \sim 25^\circ$ 时，结构面对光面爆破理想光滑壁面的形成最为不利。这与文献[1、2]的实验和经验数值相吻合。

根据表1，如取结构面的粘结力 $C = 0.07\text{MPa}$ 、 $\varphi = 20^\circ$ ，则 $g_{min}(a) \approx 0.05\text{MPa}$ 。

将上述计算结果与表2的单向静态抗拉强度比较可知，一般岩体均有 $[\sigma] > g_{min}(a)$ ，即在结构面与断裂控制面夹角对光面爆破效果最不利的情况下，一般岩体都无法获得理想光滑断裂壁面（采用常规光面爆破参数）。结构面与断裂控制面的最不利夹角与结构面的内摩擦角有关，一般为 30° 。

表2 几种岩石单向静态抗拉强度

岩石名称	砂岩	石灰岩	片麻岩	大理岩	板岩	页岩
$[\sigma]$ (GPa)	4~25	5~25	5~20	7~20	7~20	2~10

3. 层状岩体光面爆破断裂面的形成

如图3所示，设一组结构面与理想断裂控制面相交（交线与炮孔连心线垂直）。结构面与理想断裂控制面相交的夹角为 $a + 90^\circ$ 。如果(11)式不能满足，则相邻两炮孔连心线上

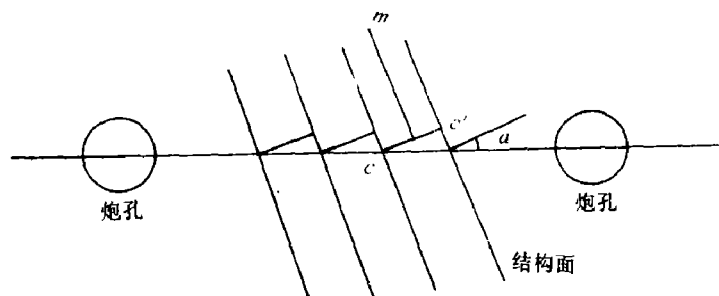


图3 层状岩体断裂面形成的分析

各点必然首先在结构处沿结构面方向发生剪切破裂。然而要形成非理想光滑断裂壁面，还必须沿与结构面垂直或近似垂直的方向（即图3中的 $c-c'$ 面）发生断裂。 $c-c'$ 面的法线方向与 x 轴的夹角近似为 $90^\circ + a$ 。

由(1)和(6)式可得 $\sigma_x = \sigma_y (3\cos 2a - 1) / 2$ 。令 $\sigma_x \leq 0$ ，得 $a \geq 35^\circ$ 。即 $a \geq 35^\circ$ 时，结构面的正应力 σ_x 就是拉应力。根据上述分析已知当 $a < 30^\circ$ 时，结构面对光面爆破在强度方面没有影响。因此下面仅考虑 $a \geq 35^\circ$ 的情况。

在结构面破坏以前, $c-c'$ 面是不会发生破坏的。因为岩石的抗拉强度最弱, 而且结构面的强度也小于岩石的强度。因此, 在爆炸应力场的作用下, 或者沿连心线 (x 轴方向) 拉伸断裂, 或者沿结构面方向破裂。如果沿结构面方向破裂, 结构面不再承载 (该面正应力受拉), 而导致 $c-c'$ 面上的应力状态发生变化, 最后形成断裂。如果 $c-c'$ 面上的应力状态不受结构面破裂的影响而变化, 那么 $c-c'$ 就不会发生断裂。

根据应力分析, 结构面破裂以前, $c-c'$ 面上的正应力和剪应力为

$$\sigma_{90+\alpha} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} (-\cos 2\alpha) \quad (14)$$

$$\tau_{90+\alpha} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} (-\sin 2\alpha) \quad (15)$$

将 $\sigma_x = -2\sigma_y$ 代入上述两式, 进一步得

$$\sigma_{90+\alpha} = \frac{\sigma_y}{2} (3\cos 2\alpha - 1) \quad (16)$$

$$\tau_{90+\alpha} = \frac{3}{2}\sigma_y \sin 2\alpha \quad (17)$$

结构面破裂以后, 如果结构面间距远小于炮孔间距, 可以近似求得 $c-c'$ 面上的应力状态。如图 4。根据平衡条件有

$$\int_0^{l_1} \tau_{90+\alpha} dl_1 + \int_0^{l_1} \sigma_{90+\alpha} \cos \alpha dl_1 \quad (18)$$

$$\int_0^{l_1} \tau_{90+\alpha} \cos \alpha dl_1 - \int_0^{l_1} \sigma_{90+\alpha} \sin \alpha dl_1 \quad (19)$$

由中值定理和几何关系: $l_1 = l \cos \alpha$, 可将(18)和(19)式变为

$$\bar{\sigma}_{90+\alpha} = \bar{\sigma}_y \quad (20)$$

$$\bar{\tau}_{90+\alpha} = \sigma_y \operatorname{tg} \alpha \quad (21)$$

式中 $\bar{\sigma}_{90+\alpha}$ 和 $\bar{\tau}_{90+\alpha}$ 分别为 $c-c'$ 面上平均正应力和平均剪应力。比较 (16) 和 (20) 式、(17) 和 (21) 式, c

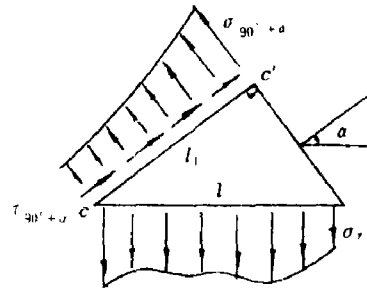


图 4 结构面破裂后的应力分析

c' 面上的应力状态在结构面破裂前后发生了明显变化, 其中正应力的绝对值在结构面破裂以后增大, 这是形成 $c-c'$ 破裂的根本原因, 而 $\sigma_y \approx \bar{\sigma}_y$ 。

因为 $c-c'$ 面上既有正应力、又有剪应力, 因此应按莫尔—库仑强度理论作为破坏的判断准则, 即应有

$$|\bar{\tau}_{90+\alpha}| \geq \bar{\sigma}_{90+\alpha} \operatorname{tg} \varphi' + C' \quad (22)$$

式中 φ' 、 C' 分别为岩石 (不包括结构面) 的内摩擦角和粘结力。将 (20)、(21) 式代入 (22) 式整理得到

$$-\sigma_y \geq \frac{C'}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi'} \quad (23)$$

在 x 轴方向发生破裂, 要求

$$-\sigma_y \geq [\sigma] \quad (24)$$

而岩石的单向抗拉强度 $[\sigma] = C' / \operatorname{tg} \varphi'$ ，显然有

$$[\sigma] > \frac{C'}{\operatorname{tg} \varphi' + \operatorname{tg} \alpha} \quad (25)$$

(23)、(24)、(25) 式说明，结构面断裂以后，必然沿 $c-c'$ 面（与结构面近似垂直）发生剪切破裂。

沿结构面和 $c-c'$ 面形成断裂以后，断裂壁面的不平整度取决于结构面的间距，即

$$\Delta = s \cos \theta \quad (26)$$

式中 Δ 为光面爆破断裂壁面的不平整度； s 为结构面间距； θ 为结构面与理想光滑断裂壁面的夹角。

断裂壁面的不平整度随结构面间距的增大而增大，随结构面与理想光滑断裂壁面的夹角增大而减小。

4. 结 语

1. 本文仅在强度方面讨论了结构面对光面爆破效果的影响，此外，结构面对爆炸应力波的衰减也存在一定影响^[7,8]。因此，从波在介质中传播的角度来说，结构面对光面爆破效果也有影响。这是结构面对光面爆破效果影响的另一个方面，有待分析研究。

2. 结构面与光面爆破断裂控制面的夹角是影响光面爆破效果的重要因素。当结构面与断裂控制面的夹角大于某一数值（一般为 60° ）时，结构面对光面爆破光滑壁面的形成在强度方面无影响。一般岩体，当结构面与光面爆破理想断裂面夹角约为 30° 时，光面爆破效果最难控制。无法形成理想的光滑壁面。

3. 光面爆破在层状岩体内形成非理想光滑壁面的原因是，结构面断裂以后，与其垂直或近似垂直面上的应力状态发生变化，从而形成“之”字形的断裂壁面。

参 考 文 献

- [1] Mckown A. F., Proc. 10th conf. Explosives and Blasting Technigue (1984), 128.
- [2] Hagan Harries, (张家凯译), 凿岩爆破技术, 武钢科协学会部 (1986), 121。
- [3] 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 (1980), 17, 91。
- [4] 王文龙, 钻眼爆破, 煤炭工业出版社 (1984), 178, 381。
- [5] 张 奇, 光面爆破机理研究 (硕士论文), 西安矿业学院 (1984)。
- [6] 于学馥等, 地下工程围岩稳定分析, 煤炭工业出版社 (1983), 30。
- [7] Dinis da Gama, (杨祖光译), 应用破碎理论预测裂隙发育岩石在爆破作用下的破碎, 第一届爆破破岩国际会议论文集, 中国长沙岩石力学工程技术咨询公司 (1984), 306。
- [8] 张 奇, 应力波在节理处的传递过程, 岩土工程学报, 6 (1986), 99。

THEORETICAL ANALYSIS OF SMOOTH BLASTING EFFECTS IN LAYERED ROCK STRUCTURE

Zhang Qi

(Xian Institute of Mines and Metallurgy)

ABSTRACT The influence of the layered rock structure on smooth blasting are discussed in this paper. When the angle between the rock layer and the splitting control surface is 25° - 35° , it is difficult to control the effect of smooth blasting, when the angle between the rock layer and the splitting control surface is 60° - 90° , the smooth blasting effect is not affected. These results are in accord with the experimental data published in references [1, 2].

KEY WORDS smoth blasting, blasting engineering.