

# 论岩体软弱结构面对应力波传播的影响

李夕兵

(中南工业大学 长沙 410083)

**摘要** 本文引入岩体软弱结构面上的边界条件,给出应力波斜入射到能滑移、有摩擦的软弱结构面时,波势、应力和能流的透反射关系和一些计算结果。在此基础上,提出了判断岩体是否沿结构面产生相对滑移的准则,给出计算结构面能量耗损的关系式和一些计算结果,并就与工程爆破有关的一些问题进行了讨论。

**关键词** 岩体软弱结构面 应力波 工程爆破 能量 摩擦

在矿岩爆破过程中,炸药爆炸后产生的冲击波随传播距离急剧衰减为应力波<sup>[1]</sup>。在矿岩破碎过程中,应力波起着极为重要的作用<sup>[2]</sup>。但天然岩体并非均质体,岩体中存在大量的软弱结构面,如断层、节理、裂隙等,它们严重地阻碍着应力波的传播,加剧了应力波能量的衰减。因此,研究结构面上应力波的传播特征对于合理地采用凿岩爆破参数,提高爆炸能量利用率,改善爆破效果;抗震防震;地球物理勘探等均有其实际意义和理论指导作用。正因如此,岩体中各种结构面、弱面和软弱夹层对应力波传播和爆破效果的影响早已引起了国内外研究者的重视<sup>[2][3][4]</sup>。但以往,人们处理这类问题均不考虑结构面间的相互滑动和摩擦,而采用完全粘结的边界条件<sup>[3][4][5]</sup>。但事实上,岩体中存在的一些软弱结构面,特别是一些构造结构面,其粘结力很小,一般小于0.1MPa,有的甚至几乎无粘结力<sup>[6][7][8]</sup>,当爆炸应力波,主要为压应力波<sup>[9]</sup>,斜入射到这些结构面时,应力波在结构面上的切向分量将有可能导致岩层的相互滑动。岩石爆破在其近区将产生球面波或柱面波,但离爆破中心较远处,可将其简化为平面波,因此,这里仅就弹性平面波遇软弱结构面的情形予以研究。

对于弹性平面波作用在非粘结性边界的情形,已有人进行过一些研究<sup>[10][11][12]</sup>;J. S. Rinehart 给出了无摩擦能自由滑动界面两侧材料相同时压应力波斜入射的透反射关系;R. K. Miller 等人提出了求解考虑界面摩擦随滑动距离和滑动速率变化时透反射关系的一种近似解法。这里作者引入岩体软弱结构面上正应力和剪应力的特定关系,给出了应力波斜入射到任意能滑动有摩擦的软弱结构面时透射和反射关系的精确表达式,和据此得到的一些计算结果,并就结构面摩擦滑移的条件,结构面上的能量耗损等一些与工程有关的问题进行了讨论。

• 本课题为国家自然科学基金资助课题。

1991年6月22日收到原稿,9月13日收到修改稿。

# 1 应力波遇结构面时的透反射关系

## 1.1 任意软弱结构面上的一般解

图 1(a)(b)分别给出了波在界面上透射和反射时波势及其所对应的应力分量关系图。设纵波和横波的波势分别为  $\Phi, \Psi$ , 入射的纵波和横波的势为  $\Phi', \Psi'$ , 反射的为  $\Phi'', \Psi''$ , 透射为  $\Phi_1', \Psi_1'$ , 则纵波波势的透射系数  $W_{11} = \Phi_1' / \Phi'$ , 纵波转化为横波的透射系数  $W_{12} = \Psi_1' / \Phi'$ , 纵波波势的反射系数  $V_{11} = \Phi'' / \Phi'$ , 纵波转化为横波的反射系数  $V_{12} = \Psi'' / \Phi'$ ,  $z \geq 0$  时, 势函数可分别写为<sup>[13]</sup>

$$\begin{aligned} \Phi &= (\Phi' e^{j\alpha z} + \Phi'' e^{-j\alpha z}) \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \\ \Psi &= (\Psi' e^{j\beta z} + \Psi'' e^{-j\beta z}) \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \end{aligned}$$

其中:  $\xi = K_1 \cdot \sin\theta = K_T \sin\gamma$ ,  $\alpha = K_1 \cdot \cos\theta$ ,  $\beta = K_T \cdot \cos\gamma$ 。

当  $z < 0$  时, 没有反射波, 只存在有透射波时有

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_1' e^{-j\alpha_1 z} \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \\ \Psi_1 &= \Psi_1' e^{-j\beta_1 z} \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \end{aligned}$$

式中:  $\xi = K_{11} \sin\theta_1 = K_{T1} \sin\gamma_1$ ,  $\alpha_1 = K_{11} \cos\theta_1$ ,  $\beta_1 = K_{T1} \cos\gamma_1$ 。

位移、应力与势函数的关系分别为

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial z}; \quad u_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x}; \quad u_y = 0 \\ \sigma_z &= \lambda \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2G \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \tau_{zx} = G \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

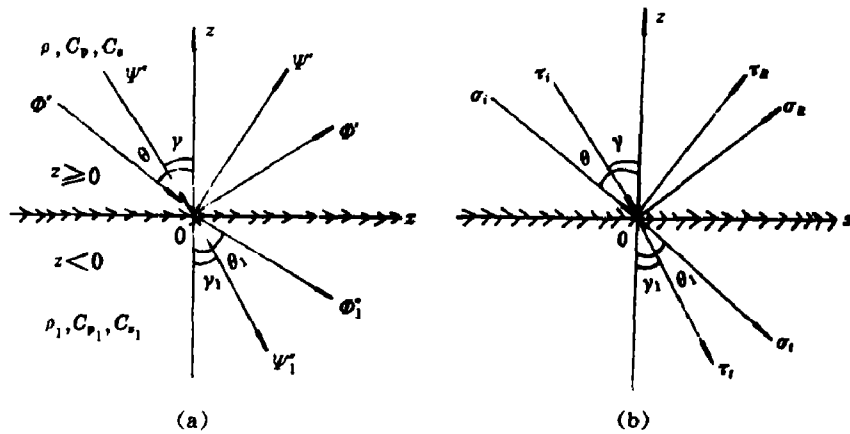


图 1 波在界面上的透射和反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the transmission and reflection of waves 在有摩擦能滑移的软弱结构面  $z=0$  上, 其应力与位移应满足下列边界条件

$$\begin{aligned} u_z(x, 0, t) &= u_{z1}(x, 0, t), \quad \sigma_z(x, 0, t) = \sigma_{z1}(x, 0, t) \\ \tau_{zx}(x, 0, t) &= \tau_{zx1}(x, 0, t), \quad \tau_{zx}(x, 0, t) = -\sigma_z(x, 0, t) \cdot \operatorname{tg}\varphi \end{aligned}$$

式中:  $\varphi$  为结构面的摩擦角。

由此可得

$$\alpha(\Phi' - \Phi'') + \xi(\Psi' + \Psi'') = -\alpha_1 \Phi_1' + \xi \Psi_1' \tag{1}$$

$$G[\beta(\Psi' - \Psi'') + p(\Phi' + \Phi'')] = G_1(-\beta_1 \Psi_1' - p_1 \Phi_1') \tag{2}$$

$$G[\alpha(\Phi' - \Phi'') - p(\Psi' + \Psi'')] = G_1(-\alpha_1\Phi_1' + p_1\Psi_1') \quad (3)$$

$$(-\alpha_1\Phi_1' + p_1\Psi_1') = (\beta_1\Psi_1' + p_1\Phi_1')\text{tg}\varphi \quad (4)$$

式中:

$$p = (\xi^2 - K_1^2/2)\xi^{-1} = -K_{T1}\cos 2\gamma/2\sin\gamma$$

$$p_1 = (\xi^2 - K_{T1}^2/2)\xi^{-1} = -K_{T1}\cos 2\gamma_1/2\sin\gamma_1$$

只考虑压应力波入射时,  $\Psi''$  应等于零, 上述式子同除以  $\Phi'$  后可得

$$\alpha(V_{II} - 1) + \xi V_{II} = -\alpha_1 W_1 + \xi W_1 \quad (5)$$

$$-p(1 + V_{II}) + \beta V_{II} = -G_1/G \cdot (\beta_1 W_1 + p_1 W_1) \quad (6)$$

$$\alpha(V_{II} - 1) + p V_{II} = G_1/G \cdot (-\alpha_1 W_1 + p_1 W_1) \quad (7)$$

$$(p_1 \text{tg}\varphi + \alpha_1)W_1 + (\beta_1 \text{tg}\varphi - p_1)W_1 = 0 \quad (8)$$

由(8)式可得

$$W_1 = \frac{p_1 - \beta_1 \text{tg}\varphi}{p_1 \text{tg}\varphi + \alpha_1} \cdot W_1 = m_1 W_1 \quad (9)$$

由(7)、(5)两式可得

$$V_{II} = \frac{\alpha_1(1 - G_1/G)m_1 + (p_1 G_1/G - \xi)W_1}{p - \xi} W_1 = n_1 W_1 \quad (10)$$

$$V_{II} = \frac{(-\alpha_1 m_1 + \xi - \xi n_1)W_1}{\alpha} + 1 \quad (11)$$

代入(6)式中, 有

$$W_1 = \frac{2p}{\frac{G_1}{G}(\beta_1 + p_1 m_1) + \beta n_1 + \frac{p\alpha_1}{\alpha} m_1 + \frac{p\xi}{\alpha}(n_1 - 1)} \quad (12)$$

根据以上各式, 即可编制相应的计算程序, 算出不同软弱结构面参数和不同波阻抗等条件下, 应力波以不同角度斜入射时各透反射波的波幅值比, 如图 2~4 所示。对于图 2 与图 3,  $\rho_1/\rho = 0.8, C_{p1}/C_p = 0.8, C_{s1}/C_{p1} = C_s/C_p = 0.6$ , 对于图 4,  $\rho_1/\rho = 2, C_{p1}/C_p = 2, C_{s1}/C_{p1} = C_s/C_p = 0.6$ 。

又入射纵波波势对应的入射应力  $\sigma_1$  及由此而产生的反射正应力  $\sigma_r$  和剪应力  $\tau_r$ , 及透射正应力  $\sigma_t$  和剪应力  $\tau_t$ , 分别为

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_1} = W_1 \cdot \rho_1/\rho \quad (13)$$

$$\sigma_r/\sigma_1 = V_{II} \quad (14)$$

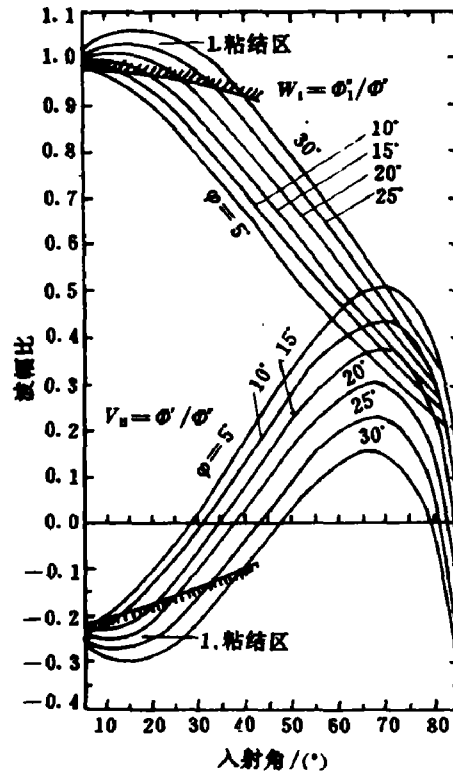


图 2 应力波通过有摩擦的软弱结构面时波幅的透反射系数  $W_1, V_{II}$

Fig. 2 Ratios of the amplitudes of the transmitted and reflected longitudinal waves to the amplitude of the incident compression wave,  $W_1, W_{II}$  vs incident angle  
1. Bonding region

$$\frac{\tau_i}{\sigma_i} = W_i \cdot \rho_1 / \rho \tag{15}$$

$$\frac{\tau_r}{\sigma_i} = V_{ii} \tag{16}$$

因此,求出了  $W_i, V_{ii}, W_r, V_{rr}$  后,对应的应力透反射系数也就不难得出了。

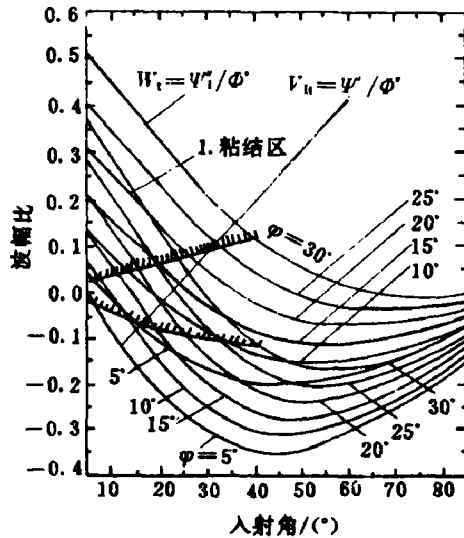


图 3 应力波通过有摩擦的软弱结构面时纵波转化为横波的透反射系数  $W_i, V_{ii}$

Fig. 3 Ratios of the amplitudes of the transmitted and reflected transverse waves to the amplitude of the incident compression wave,  $W_i, V_{ii}$ , vs incident angle  
1. Bonding region

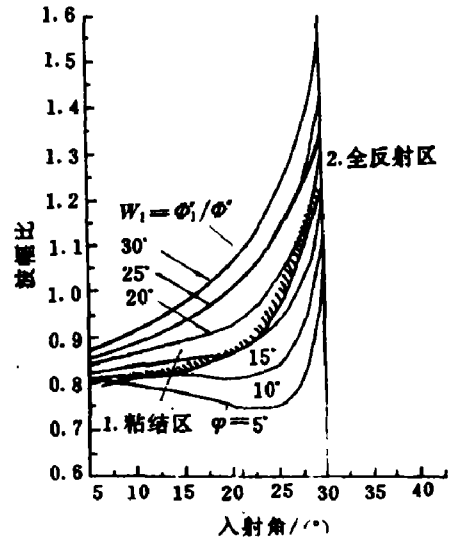


图 4 应力波通过有摩擦的软弱结构面时的纵波透射系数  $W_i$

Fig. 4 Ratios of the amplitude of the transmitted longitudinal waves to the amplitude of the incident compression wave,  $W_i$  vs incident angle  
1. Bonding region; 2. Total reflection region

### 1.2 结构面两侧岩体相同的情形

岩体中的一些结构面,特别是一些由于构造应力场作用形成的断层、裂隙等大都有可能穿过同一岩体,此时,  $\rho_1/\rho=1, C_{p1}/C_p=1$ , 由(10)式可得  $n_1=1$ , (12)、(11)式分别变为

$$W_i = p / (\beta + pm) \tag{17}$$

$$V_{ii} = \beta / (\beta + pm) \tag{18}$$

式中:

$$\beta = K_T \cos \gamma,$$

$$p = -K_T \cos 2\gamma / 2 \sin \gamma,$$

$$m = \frac{\cos 2\gamma + 2 \operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \gamma \cdot \cos \gamma}{\cos 2\gamma \operatorname{tg} \varphi - 2 \sin \gamma \cos \theta \cdot (C_s/C_p)}$$

将  $\beta, p, m$  代入后可得

$$V_{ii} = \frac{(C_s/C_p)^2 \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\gamma} - \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{ctg} 2\gamma + (C_s/C_p)^2 \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\gamma}} \tag{19}$$

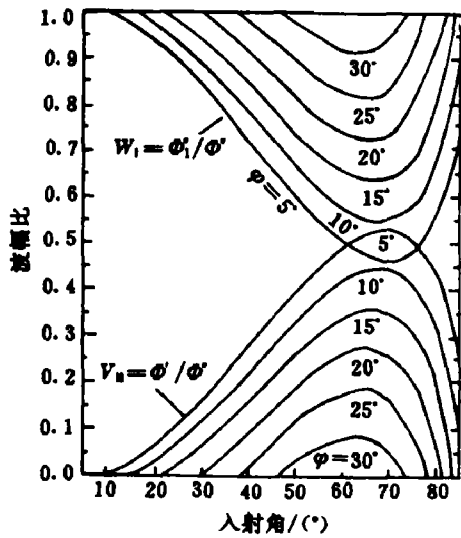


图5 软弱结构面两侧岩体相同时不同摩擦角下的纵波透反射系数

Fig. 5 Ratios of the amplitudes of the transmitted and reflected longitudinal waves to the amplitude of the incident compression wave vs incident angle

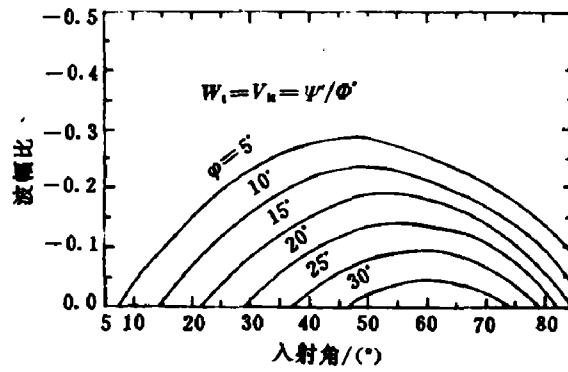


图6 软弱结构面两侧岩体相同时不同摩擦角下纵波转化为横波的透反射系数

Fig. 6 Ratios of the amplitudes of the transmitted and reflected transverse waves to the amplitude of the incident compression wave vs incident angle

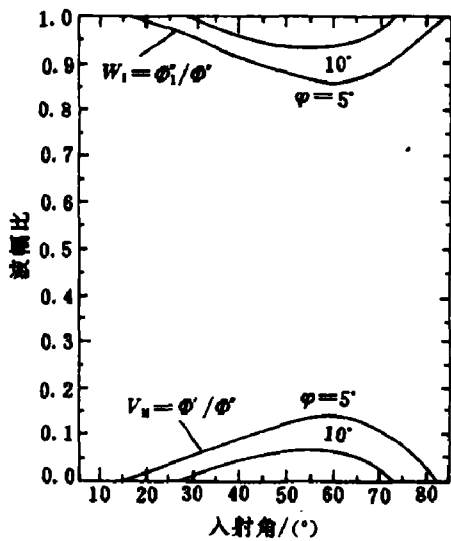


图7 软弱结构面两侧岩体相同时不同摩擦角下的纵波透反射系数

Fig. 7 Ratios of the amplitude of the transmitted and reflected longitudinal waves to the amplitude of the incident compression wave vs incident angle

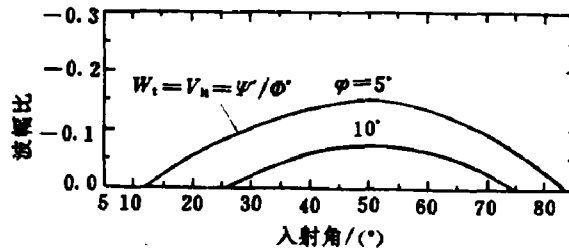


图8 软弱结构面两侧岩体相同时不同摩擦角下纵波转化为横波的透反射系数

Fig. 8 Ratios of the amplitude of the transmitted and reflected transverse waves to the amplitude of the incident compression wave vs incident angle ( $C_s/C_p=0.45$ )

$$W_1 = V_{11} = \frac{\operatorname{tg}\varphi - (C_s/C_p)^2 \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\gamma}}{1 + \operatorname{tg} 2\gamma \cdot \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\gamma} (C_s/C_p)^2} \quad (20)$$

$$W_1 = \frac{\operatorname{ctg} 2\gamma + \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{ctg} 2\gamma + (C_s/C_p)^2 \frac{\sin 2\theta}{\cos 2\gamma}} \quad (21)$$

图5与图6给出了  $C_s/C_p=0.6$  (对应的泊松比  $\mu=0.22$ ) 时不同摩擦角下压应力波斜入射时各波波势幅值的关系;图7与图8中  $C_s/C_p=0.45$  ( $\mu=0.37$ )。

令  $\operatorname{tg}\varphi=0$ , 即为结构面两侧岩体可自由滑动的情形。由(19)~(21)式可得到在此条件下各波幅比值与入射角之间的关系,这与文献[10]所给出的关系是一致的,即

$$V_{11} = \frac{\sin 2\theta \cdot \sin 2\gamma}{(C_p/C_s)^2 \cos^2 2\gamma + \sin 2\theta \cdot \sin 2\gamma} \quad (22)$$

$$W_1 = V_{11} = - \frac{\left(\frac{C_p}{C_s}\right) \cdot \sin 2\theta \cdot \cos 2\gamma}{(C_p/C_s)^2 \cos^2 2\gamma + \sin 2\theta \cdot \sin 2\gamma} \quad (23)$$

$$W_1 = \frac{(C_p/C_s)^2 \cos 2\gamma}{(C_p/C_s)^2 \cos^2 2\gamma + \sin 2\theta \cdot \sin 2\gamma} \quad (24)$$

文献[10]还给出了利用上述关系算出  $\mu=0.25$  和  $\mu=0.4$  时各波幅值随入射角变化的关系图及其求解爆炸时位移沿着岩石裂隙构造与原有断层发展的积分表达式。

## 2 软弱结构面上的能流分布及其摩擦滑移的条件

### 2.1 软弱结构面上的能流分布

设应力波入射到单位面积结构面上的能流为  $\bar{E}_{pi}$ , 则

$$\bar{E}_{pi} = \frac{1}{2} \rho \Phi^2 \omega^2 / C_p \quad (25)$$

相应地,透射纵波、透射横波、反射纵波、反射横波的能流  $\bar{E}_{pt}$ 、 $\bar{E}_{st}$ 、 $\bar{E}_{pv}$ 、 $\bar{E}_{sv}$  以及它们与入射能流的比值  $e_{pt}$ 、 $e_{st}$ 、 $e_{pv}$ 、 $e_{sv}$  分别为

$$\bar{E}_{pt} = \frac{1}{2} \rho_1 \Phi_1^2 \frac{\omega^2 \cos \theta_1}{C_{p1} \cos \theta} \quad , \quad e_{pt} = \frac{\rho_1 \operatorname{tg} \theta}{\rho \operatorname{tg} \theta_1} \cdot W_1^2 \quad (26)$$

$$\bar{E}_{st} = \frac{1}{2} \rho_1 \Psi_1^2 \frac{\omega^2 \cos \gamma_1}{C_{s1} \cos \theta} \quad , \quad e_{st} = \frac{\rho_1 \operatorname{tg} \theta}{\rho \operatorname{tg} \gamma_1} \cdot W_1^2 \quad (27)$$

$$\bar{E}_{pv} = \frac{1}{2} \rho \Phi^2 \omega^2 / C_p \quad , \quad e_{pv} = V_{11}^2 \quad (28)$$

$$\bar{E}_{sv} = \frac{1}{2} \rho \Psi^2 \frac{\omega^2 \cos \gamma}{C_s \cos \theta} \quad , \quad e_{sv} = \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \gamma} \cdot V_{11}^2 \quad (29)$$

由此可见,当结构面上的  $W_1$ 、 $W_s$ 、 $V_{11}$ 、 $V_{1s}$  求得,则对应的能量分布也就不难求出了。

### 2.2 摩擦滑移的条件及应力波在结构面上的能量耗损

对于完全粘结的交界面,不管应力波以任何角度入射都不会引起相对滑动和能量耗损,在某一时间内的入射能流将恒等于该时间内总的反射能流加上总的透射能流。但对于

有摩擦的结构面,应力波斜入射时,存在两种情况:(1) $\tau < \sigma \tan \varphi$ ,此时,结构面两侧岩体不会产生相对滑动,结构面上也不可能能量耗损,结构面上的透反射关系可按完全粘结条件进行。(2) $\tau \geq \sigma \tan \varphi$ ,此时结构面两侧岩体将产生相对滑动,结构面必然要吸收一部分应力波能量对此做功,因而波在结构面上的透反射必将伴随有一部分能量的耗损。据此,不难得出,判定岩体沿结构面产生滑移的条件为结构面上是否存在能量耗损,即

$\bar{E}_A > 0$  或  $e_A > 0$ , 则产生相对滑动

$\bar{E}_A = 0$  或  $e_A = 0$ , 则不产生相对滑动

$$\bar{E}_A = \bar{E}_m - \bar{E}_r - \bar{E}_a - \bar{E}_{pV} - \bar{E}_{sV} \quad (30)$$

$$e_A = \frac{\bar{E}_A}{\bar{E}_m} = 1 - \frac{\rho_1 \tan \theta W_1^2}{\rho \tan \theta_1 W_1^2} - \frac{\rho_1 \tan \theta W_1^2}{\rho \tan \theta_1 W_1^2} - V_{II}^2 - V_{II}^2 \frac{\tan \theta}{\tan \gamma} \quad (31)$$

据此,我们即可算出不同软弱结构面参数和岩体波阻抗等条件下结构面上的能量耗损,如图9与图10所示。同时,还可很方便地确定不同软弱结构面参数下导致岩体相对滑移的入射角范围。如图11~13所示。

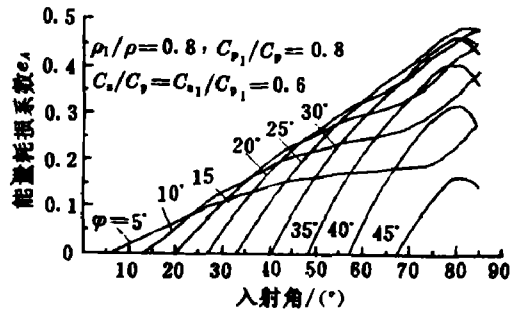


图9 结构面上的能量耗损随入射角变化的关系曲线

Fig. 9 The relations between the incident angles of compression wave and energy absorption coefficient at the structural weakness plane with different frictional angles vs incident angle

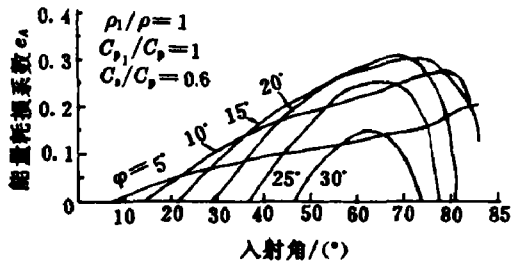


图10 结构面两侧岩体相同时结构面上能量耗损随入射角变化的关系

Fig. 10 The relations between the incident angles of compression wave and energy absorption coefficient at the structural weakness plane situated in the same rock vs. incident angle

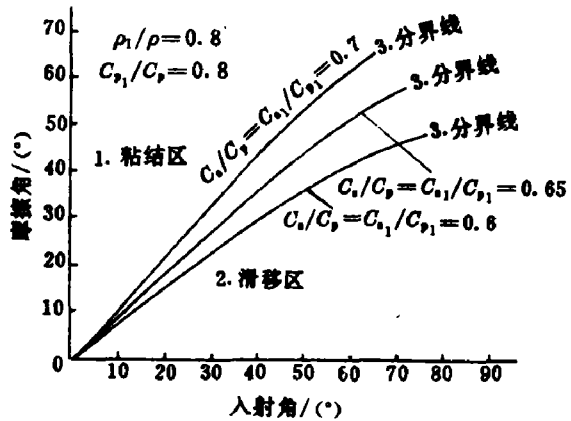


图11 不同软弱结构面参数下导致岩体产生相对滑移的入射角范围

Fig. 11 The critical incident angles resulting in the relative slipping of rocks on both sides of the structural weakness plane vs. incident angle

1. Bonding region; 2. Slide region; 3. Line of Separation

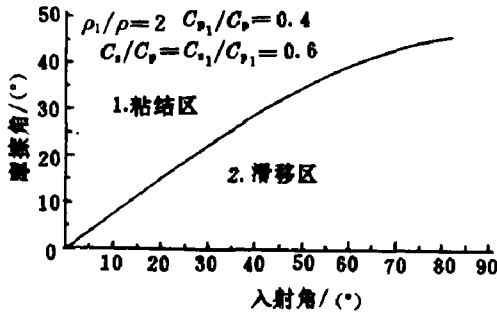


图 12 不同软弱结构面参数下导致岩体产生相对滑移的入射角范围

Fig. 12 The critical incident angles resulting in the relative slipping of rocks on both sides of the structural weakness plane vs incident angle  
1. Bonding region; 2. Slide region

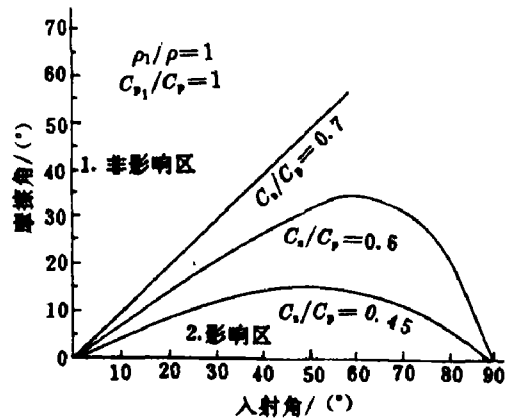


图 13 结构面两侧岩体相同时不同软弱结构面参数下影响应力波的入射角范围

Fig. 13 The critical incident angles resulting in the relative slipping of rocks on both sides of the structural weakness plane situated in the same rock vs. incident angle  
1. Non-influential region;  
2. Region of influence

### 3 结论与讨论

1 对于任意的软弱结构面,可根据本文所推得的关系编制的计算程序,算出在滑移条件下的透反射关系及其结构面上的能量损耗系数,进而可根据摩擦滑移条件即  $e_A$  是否大于零确定出不同结构面参数下导致岩体产生相对滑移的入射角范围  $[\alpha_1, \alpha_2]$ 。当入射角  $\theta$  小于  $\alpha_1$  和大于  $\alpha_2$  时,结构面上的透反射关系应重新按完全粘结的条件计算。

2 当入射角  $\theta$  小于  $\alpha_1$  或大于  $\alpha_2$  时,岩体不沿结构面产生相对滑移,这表明,在该入射角范围内,结构面不影响波的传播,因而此时的结构面就相当于广义的介质分界面,若结构面两侧岩石性质相同,则意味着应力波在界面不产生反射,而象没有结构面一样完全进入结构面的另一侧。

3 从图 11~13 均可看出:不同的岩体波阻特性和软弱结构面,影响波传播的入射角范围  $[\alpha_1, \alpha_2]$  是不同的。结构面的摩擦角越大,其影响范围越小,当达到极限摩擦角  $\varphi_c$  时,压应力波无论以何角度入射,均不会导致结构面两侧岩体的相对滑移。同时,图中示出的结果也清楚地表明:  $\varphi_c$  值随泊松比的增大 ( $C_s/C_p$  值的减小) 而降低,因此在分析爆破震动等对岩土工程的稳定性时,首先必须严格把握其岩土工程的波阻特性和贯穿性构造结构面的摩擦系数。不同岩体性质条件下的极限摩擦角为:当  $\rho_1/\rho = 0.8, C_{p1}/C_p = 0.8, C_s/C_p = C_{s1}/C_{p1} = 0.6$  时,  $\varphi_c = 50^\circ$ ; 当  $\rho_1/\rho = 2, C_{p1}/C_p = 2, C_{s1}/C_{p1} = C_s/C_p = 0.6$  时,  $\varphi_c = 18^\circ$ ; 当  $\rho_1/\rho = 2, C_{p1}/C_p = 0.4, C_s/C_p = C_{s1}/C_{p1} = 0.6$  时,  $\varphi_c = 45^\circ$ ; 若结构面两侧岩体相同,则  $C_s/C_p = 0.6$  时,  $\varphi_c = 35^\circ, C_s/C_p = 0.45$  时,  $\varphi_c = 15^\circ$ 。



4 从图 9,图 10 可以看出:对确定的岩体均有最不利于波传播的岩体软弱结构面和入射角( $e_{\alpha}$  最大)。当爆炸应力波以最不利于波传播的入射角入射到这样的结构面时,结构面将会吸收近一半的入射波能量用于产生相对滑移。显然,这样的结构面和能导致这样的入射角的振源应作为抗震防震的重点;在矿山爆破破岩过程中,若药包附近存在这样的结构面,而且爆炸应力波又是以这样的入射角进入结构面时,可能会导致大块的产生。因此在工程实际中,必须针对不同的地质构造和岩体特征,合理选择爆破参数,避免应力波以最不利于波传播的入射角传播。

最后应提及的是以上分析中没有考虑岩体内部的自重应力,因此实际能导致影响波传播的入射角范围会略小于以上的分析结果。

感谢古德生教授和赖海辉教授对本文初稿提出的许多指导性意见。

### 参 考 文 献

- 1 A H 哈努卡耶夫著,刘殿中译. 矿岩爆破物理过程. 北京:冶金工业出版社,1980.
- 2 Roger Holmberg, Agne Rustan. Rock Fragmentation by Blasting. TECE-tryck AB, Lulea, Sweden, 1983.
- 3 Tooley R D. Geophysics, 1965,30:552
- 4 Koefoed O, N De Voogd. Geophysics, 1980,45(8):1254
- 5 王文龙. 钻眼爆破. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- 6 钟时猷. 岩石力学(教材). 长沙:中南工业大学教材,1987.
- 7 李中林,等. 矿山岩体工程地质力学. 北京:冶金工业出版社,1987.
- 8 Angenheister G, L B V/Ib. Berlin: Springer-verlag, 1982.
- 9 Starfield A M, Pugliese J M. Int J Rock Mech Min Sci, 1968,5(1):65
- 10 Rinehart J S 著,杨善元译. 固体中的应力瞬变. 北京:煤炭工业出版社,1981.
- 11 Miller R K. J A M, 1977,44:652
- 12 Miller R K, Tran H T. J A M, 1981,48(1):155
- 13 J M 布列霍夫斯基著,杨训仁译. 分层介质中的波. 第二版. 北京:科学出版社,1985.

## INFLUENCE OF THE STRUCTURAL WEAKNESS PLANES IN ROCK MASS ON THE PROPAGATION OF STRESS WAVES

Li Xibing

(Central South University of Technology, Chongsha, Hunan, 410083)

**ABSTRACT** In this paper, the relations among wave potentials, stresses, and energy of the incident compression wave, the refracted, reflected longitudinal and transverse waves, the formula of energy absorption of the structural weakness plane, and some computational results have been obtained according to the boundary conditions at the structural weakness plane with friction slipping. The criterion for judging if rocks on both sides of the plane slip relatively along the plane is proposed. On this basis, some problems about engineering blasting is discussed.

**KEY WORDS** structural weakness plane of rock, stress wave, engineering blasting, energy, friction.