

爆炸应力波斜入射岩体软弱结构面的透反射关系和滑移准则^①

李夕兵^② 赖海辉^③ 古德生^③

(中南工业大学)

摘 要

应力波通过岩体软弱结构面的透反射关系,一直按完全粘结边界条件下所获得的研究结果进行处理。考虑到应力波斜入射岩体软弱结构面时有可能产生滑移这一事实,本文在引入岩体软弱结构面的边界条件后,给出了有摩擦滑移条件下爆炸应力波通过软弱结构面时的透反射关系,并就结构面的摩擦滑移条件和结构面上的能量耗损等问题进行了讨论。

关键词: 岩体软弱结构面, 应力波, 工程爆破, 摩擦, 滑移

在矿岩爆破过程中,冲击波的能量随其传播距离的增加而急剧衰减,在离开爆破中心10~15倍药包半径处,岩体中的冲击波便转化为应力波^[1]。但天然岩体多非均质体,其中存在有不同成因、不同特征的各种地质界面,如断层、节理、裂隙等,由于它们胶结不牢或强度较低,常称其为岩体软弱结构面。这些软弱结构面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,研究岩体软弱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;抗震防震和地球物理勘探等,均有其实际意义和理论指导作用。因此,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国内外研究者的重视^[2,3,4]。不过以往的研究在处理这类问题时均未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^[5]。事实上,岩体中存在的软弱结构面,特别是一些构造结构面,粘结力一般小于

0.1MPa,有的甚至几乎不存在粘结力^[6,7],当爆炸应力波主要为压应力波^[8]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,基于这一问题,并考虑到岩体软弱结构面上正应力与剪应力的特定关系,本文给出了在有摩擦滑移条件下,应力波通过岩体软弱结构面时的透反射关系,并就结构面的摩擦滑移条件和能量耗损等问题进行了讨论。

1 摩擦滑移条件下的透反射关系

如图1所示,设纵波和横波的波势分别为 Φ 、 Ψ ;入射的纵、横波为 Φ'' 、 Ψ'' ,反射的为 Φ' 、 Ψ' ,透射为 Φ_1'' 、 Ψ_1'' ,则纵波波势的透射系数为 $W_l = \Phi_1'' / \Psi''$,纵波转化为横波的透射系数为 $W_t = \Psi_1'' / \Phi''$,纵波波势的反射系数为 $V_{ll} = \Phi' / \Phi''$,纵波转化为横波的反射系数为 $V_{lt} = \Psi' / \Phi''$ 。

①本文属国家自然科学基金资助课题,于1991年9月15日收到修正稿

②博士研究生; ③教授

$z > 0$ 时, 势函数分别为^[10]

$$\Phi = (\Phi' e^{j\alpha z} + \Phi'' e^{-j\alpha z}) \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \quad (1)$$

$$\Psi = (\Psi' e^{j\beta z} + \Psi'' e^{-j\beta z}) \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \quad (2)$$

式中 $\xi = k_1 \sin \theta = k_t \sin \gamma$; $\alpha = k_1 \cos \theta$; $\beta = k_t \cos \gamma$; k_1 、 k_t 分别为纵波和横波的波数

$z < 0$ 时, 没有反射波, 只有透射波。

$$\Phi_1 = \Phi''_1 e^{-j\alpha_1 z} e^{j(\xi x - \omega t)} \quad (3)$$

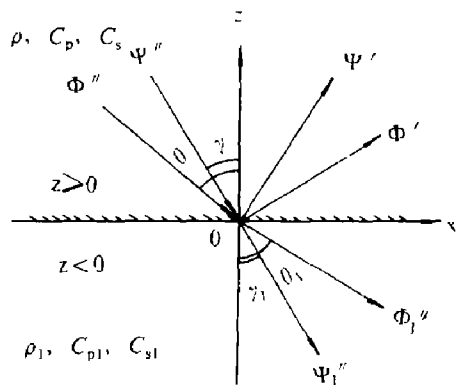


图1 波在界面上的透射和反射关系

$$\Psi_1 = \Psi''_1 e^{-j\beta_1 z} \cdot e^{j(\xi x - \omega t)} \quad (4)$$

式中 $\xi = k_{11} \sin \theta_1 = k_{11} \sin \gamma_1$,

$$\alpha_1 = k_{11} \cos \theta_1, \quad \beta_1 = k_{11} \cos \gamma_1$$

位移 U 、应力 σ 与势函数的关系分别为

$$\left. \begin{aligned} U_x &= \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial z}; \\ U_z &= \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x}; \quad U_y = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \lambda \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right) + 2G \frac{\partial U_z}{\partial z}; \\ \tau_{zx} &= G \left(\frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

上述式中 λ 为拉梅常数, G 为剪切模量。

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

$$U_z(x, t) = U_{z_1}(x, t) \quad (7)$$

$$\sigma_z(x, t) = \sigma_{z_1}(x, t) \quad (8)$$

$$\tau_{zx}(x, t) = \tau_{zx_1}(x, t) \quad (9)$$

$$\tau_{zx}(x, t) = -\sigma_z(x, t) \tan \varphi \quad (10)$$

式中 φ 为结构面的摩擦角

由此可得:

$$\begin{aligned} \alpha(\Phi' - \Phi'') + \xi(\Psi' + \Psi'') \\ = -\alpha_1 \Phi''_1 + \xi \Psi''_1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} G[\beta(\Psi' - \Psi'') + p(\Phi' + \Phi'')] \\ = G_1(-\beta_1 \Psi''_1 - p_1 \Phi''_1) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} G[\alpha(\Phi' - \Phi'') - p(\Psi' + \Psi'')] \\ = G_1(-\alpha_1 \Phi''_1 + p_1 \Psi''_1) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} (-\alpha_1 \Phi''_1 + p_1 \Psi''_1) \\ = (\beta_1 \Psi''_1 + p_1 \Phi''_1) \tan \varphi \end{aligned} \quad (14)$$

(11)~(14)式中

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

只考虑压应力波入射时, Ψ'' 应等于零,

(11)~(14)式各除以 Φ'' 后可得

$$\alpha(V_{11} - 1) + \xi V_{11} = -\alpha_1 W_1 + \xi W_1 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \alpha(V_{11} - 1) + p V_{11} \\ = G_1(-\alpha_1 W_1 + p_1 W_1) / G \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} -p(1 + V_{11}) + \beta V_{11} \\ = -G_1(\beta_1 W_1 + p_1 W_1) / G \end{aligned} \quad (17)$$

$$(p_1 \tan \varphi + \alpha_1) W_1 + (\beta_1 \tan \varphi - p_1) W_1 = 0 \quad (18)$$

由(18)式可得

$$\begin{aligned} W_1 &= W_t (p_1 - \beta_1 \tan \varphi) / (p_1 \tan \varphi + \alpha_1) \\ &= m_1 W_t \end{aligned} \quad (19)$$

由(17)及(15)式可得

$$\begin{aligned} V_{11} &= [\alpha_1 (1 - G_1 / G) m_1 + (G_1 p_1 / G - \\ &\quad \xi)] W_t / (p - \xi) = n_1 W_t \end{aligned} \quad (20)$$

$$V_{11} = 1 + (\xi - \alpha_1 m_1 - n_1 \xi) W_t / \alpha \quad (21)$$

代入(17)式, 则有

$$\begin{aligned} W_t &= 2p / [(\beta_1 + p_1 m_1) G_1 / G + \beta n_1 + \\ &\quad p \xi (m_1 \alpha_1 / \xi + n_1 - 1) / \alpha] \end{aligned} \quad (22)$$

根据以上各式, 即可编制相应的计算程序, 求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、反射波的透反射系数, 即波势幅值比。其中图2和图3所对应的 $\rho_1 / \rho = 0.8$, $C_{p1} / C_p = 0.8$, $C_{s1} / C_{p1} = C_s / C_p = 0.6$; 图4所对应的 ρ_1 / ρ

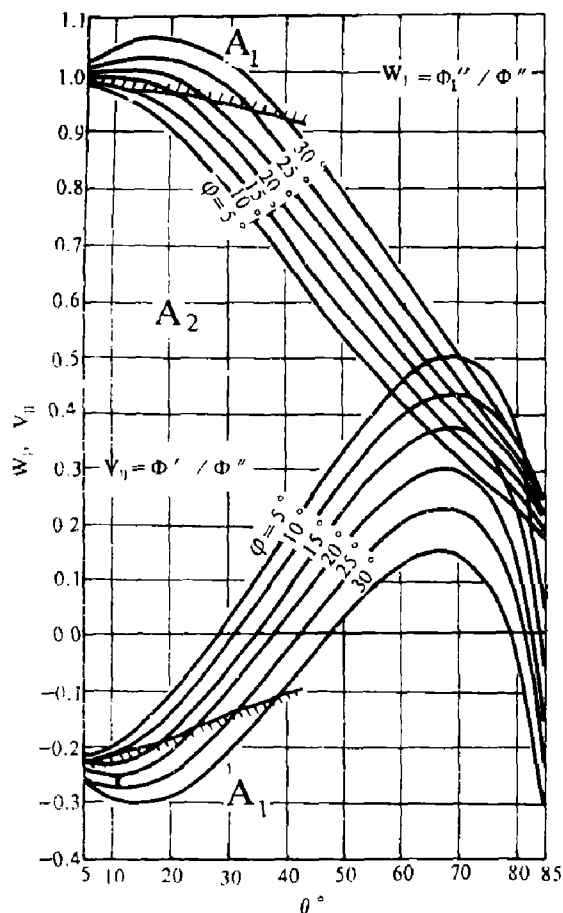


图2 压应力波通过岩体软弱结构面时纵波的透反射系数 W_{II} , V_{II}

A_1 ——粘结区; A_2 ——滑移区

$=2$, $C_{p1}/C_p=2$, $C_{s1}/C_{p1}=C_s/C_p=0.6$. 图5, 图6为结构面两侧岩体相同时的情形, 即 $\rho_1/\rho=1$, $C_{p1}/C_p=1$. 图5所对应的 $C_s/C_p=0.6$, 图6对应的 $C_s/C_p=0.45$.

事实上, 当结构面两侧岩体相同时, 不难由以上各式推得

$$V_{II} = [(C_s/C_p)^2 (\sin 2\theta / \cos 2\gamma) - \tan \Phi] / [(\tan 2\gamma + (C_s/C_p)^2 (\sin 2\theta / \cos 2\gamma))] \quad (23)$$

$$W_I = [\tan \Phi - (C_s/C_p)^2 \sin 2\theta / \cos 2\gamma] / [1 + \tan 2\gamma \cdot \sin 2\theta / \cos 2\gamma \cdot (C_s/C_p)^2] = V_{II} \quad (24)$$

$$W_I = (\tan 2\gamma + \tan \Phi) / [\tan 2\gamma + (C_s/C_p)^2 \sin 2\theta / \cos 2\gamma] \quad (25)$$

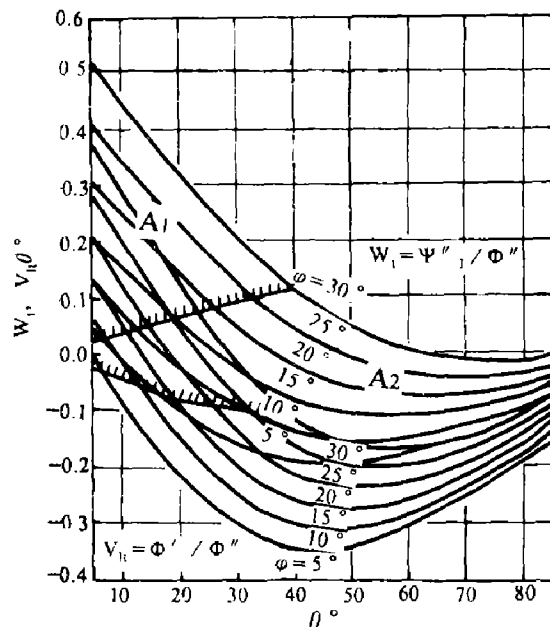


图3 应力波通过有摩擦的软弱结构时纵波转化为横波的透反射系数 W_I , V_{II}

A_1 ——粘结区; A_2 ——滑移区

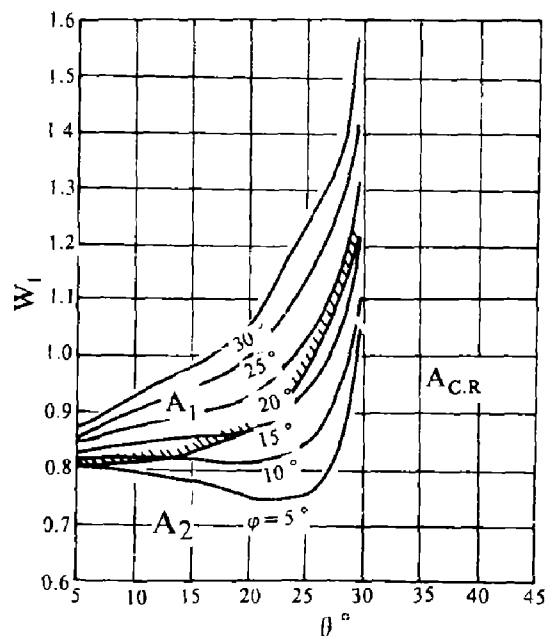


图4 应力波通过有摩擦的软弱结构面时的纵波透射系数 W_I

A_1 ——粘结区; A_2 ——滑移区; A_{CR} ——全反射区

再令 $\tan \Phi = 0$, 即为结构面两侧岩体可自由滑动的情形, 此时

$$V_{II} = \sin 2\theta \sin 2\gamma / [(C_p/C_s)^2 \cos^2 2\gamma +$$

$$\sin 2\theta \sin 2\gamma] \quad (26)$$

$$W_i = -(C_p / C_s) \sin 2\theta \cos 2\gamma / [(C_p / C_s)^2 \cos^2 2\gamma + \sin 2\theta \sin 2\gamma] = V_{li} \quad (27)$$

$$W_i = (C_p / C_s)^2 \cos 2\gamma / [(C_p / C_s)^2 \cos^2 2\gamma + \sin 2\theta \sin 2\gamma] \quad (28)$$

这与文献^[9]所给出的关系是一致的。

由于各应力分量比值与波势比值间存在有如下关系

$$\sigma_t / \sigma_i = W_i \cdot \rho_1 / \rho \quad (29)$$

$$\sigma_r / \sigma_i = V_{li} \quad (30)$$

$$\tau_t / \sigma_i = W_i \cdot \rho_1 / \rho \quad (31)$$

$$\tau_r / \sigma_i = V_{li} \quad (32)$$

因此求出了各波的波势幅值之后，也就相当于求出了各波应力分量的比值。

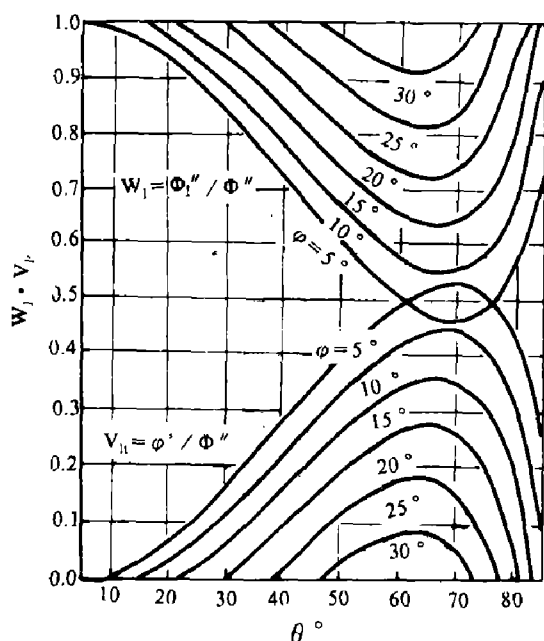


图5 软弱结构面两侧岩体相同时不同摩擦角下的纵波反射系数 W_i , V_{li}

2 摩擦滑移条件和能量耗损

对于完全粘结的交界面，应力波从任何角度入射都不会引起相对滑动和能量耗损，即在某一时间内的入射能流将恒等于该时间内的总

反射能流加总透射能流。对于有可能出现摩擦滑移的结构面，应力波斜入射时，只要 $\tau > \sigma \tan \phi$ ，两侧岩体便将产生相对滑动，结构面上必然吸收一部分应力波能量以补偿此相对滑动所需要的能量，这意味着波在结构面上的透反射必将伴有部分能量耗损。据此，不难推断：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。

设应力波入射到单位面积结构面上的能流为 $\bar{E}_{pi}$ ，则

$$\bar{E}_{pi} = \rho \Phi''^2 \omega^2 / 2C_p \quad (33)$$

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

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_{pt} &= \frac{1}{2} \rho_1 \Phi_1''^2 \frac{\omega^2 \cos \theta_1}{C_{p1} \cos \theta} \\ e_{pt} &= W_i^2 \frac{\rho_1 \tan \theta}{\rho \tan \theta_1} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_{st} &= \frac{1}{2} \rho_1 \Psi_1''^2 \frac{\omega^2 \cos \gamma_1}{C_{s1} \cos \theta} \\ e_{st} &= \frac{\rho_1 \tan \theta}{\rho \tan \gamma_1} \cdot W_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_{pr} &= \frac{1}{2} \rho \Phi''^2 \omega^2 / C_p \\ e_{pr} &= V_{li}^2 \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{E}_{sr} &= \frac{1}{2} \rho \Psi''^2 \frac{\omega^2 \cos \gamma}{C_s \cos \theta} \\ e_{sr} &= \frac{\tan \theta}{\tan \gamma} \cdot V_{li}^2 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

因而，摩擦滑移准则为：

$$\bar{E}_A > 0$$

$$\text{或 } e_A > 0$$

在此， $\bar{E}_A$ 为结构面上的能量耗损； e_A 为能量耗损系数

$$\bar{E}_A = \bar{E}_{pi} - \bar{E}_{pt} - \bar{E}_{st} - \bar{E}_{pr} - \bar{E}_{sr} \quad (38)$$

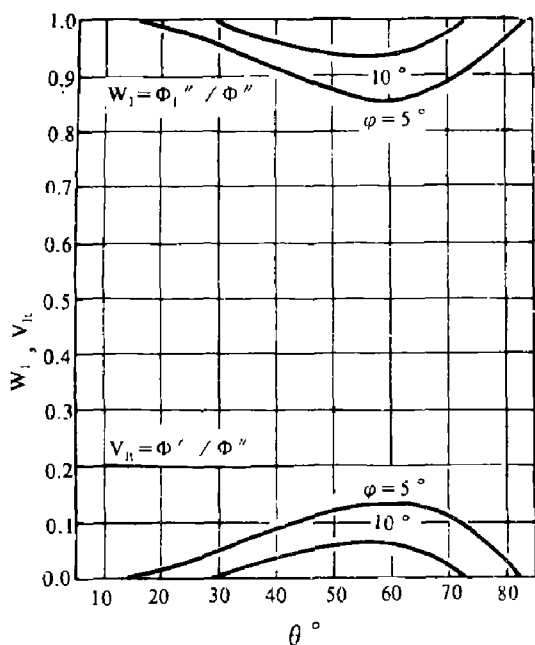


图6 软弱结构面两侧岩体相同时不同摩擦角下的纵波透反射系数 W_I , V_R

$$e_A = \frac{\bar{E}_A}{E_{pi}} = 1 - \frac{\rho_1 \tan \theta}{\rho \tan \theta_1} W_I^2 - \frac{\rho_1 \tan \theta}{\rho \tan \theta_1} W_I^2 - \frac{V_R^2 - V_R^2 \tan \theta}{V_R^2 \tan \theta} \quad (39)$$

利用以上所得, 不难求出 (1) 不同软弱结构面参数和岩体波阻抗条件下, 结构面上的能量耗损, 如图7和8所示; (2) 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9~10所示。

3 结论与讨论

1 对于任意软弱结构面, 均可根据本文所推得的关系编制计算程序, 求出在滑移条件下的透反射关系及其结构面上的能量耗损系数; 进而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 $[\theta_1, \theta_2]$ 。当入射角小于 θ_1 和大于 θ_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 θ 小于 θ_1 或大于 θ_2 时, 岩

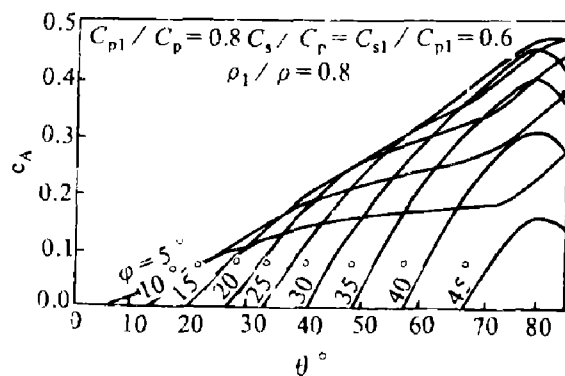


图7 能量耗损系数 e_A 与入射角 θ 的关系

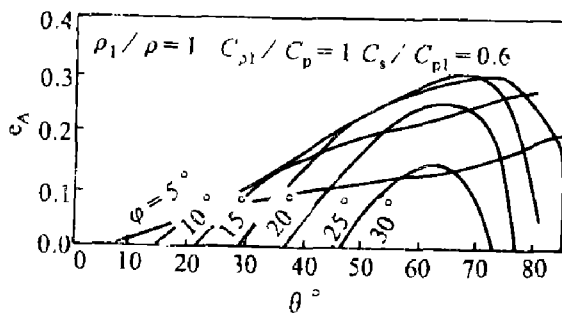


图8 结构面两侧岩体相同时的 e_A 与 θ 的关系

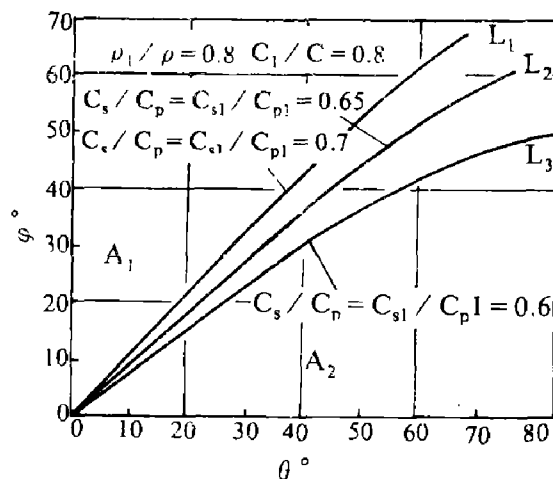


图9 导致岩体相对滑移的入射角 θ 的范围

A_1 —粘结区, A_2 —滑移区; L_1 , L_2 , L_3 —分界线

体不会沿结构面产生相对滑移, 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, 就象没有结构面一样完全进入结构面的另一侧;

3 从图9和10可以看出: 不同的岩体软弱结构面和波阻特性, 产生滑移的入射角范围

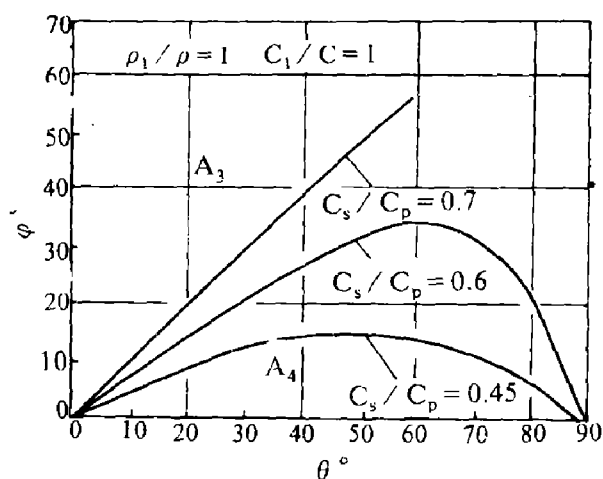


图10 结构面两侧岩体相同时对应应力波
有影响的入射角范围

A₃—无影响区; A₄—影响区

$[\theta_1, \theta_2]$ 是不同的, 而且摩擦角越大, 其影响范围越小, 当达到极限摩擦角 φ_c 时, 结构面将不对波的传播产生影响;

4 就抗震防震而言, 必须仔细调查岩土工程中存在的大型软弱结构面及其可能产生的各种振源, 加固有可能滑移的各种振患; 相反, 对于矿岩破碎, 应尽可能地利用岩块中的各种结构面, 并选择合理的加载方向, 使其沿

结构面产生剪切破碎, 以达到节省能量, 提高破岩效率的目的。

参考文献

- 1 哈努长耶夫 A H 著, 刘殿中译. 矿岩爆破物理过程. 北京: 冶金工业出版社, 1980
- 2 Holmberg R, Rustan A. Rock Fragmentation by Blasting. TECE-tryck AB, Lulea, Sweden, 1983
- 3 Tooley R D. Geophysics, 1965, 30: 552
- 4 Koefoed O, et al. Geophysics, 1980, 45(8): 1254
- 5 王文龙. 钻眼爆破. 北京: 煤炭工业出版社, 1984
- 6 李中林. 矿山岩体工程地质力学. 北京: 冶金工业出版社, 1987
- 7 Angenheister G, L. B. V/Ib, Berlin. Springer-Verlag, 1982
- 8 Starfield A M, Pugliese J M. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1968; 5(1): 65
- 9 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
- 10 布列霍夫斯基赫 L M 著, 杨训仁译. 分层介质中的波, 第二版. 北京: 科学出版社, 1985