

爆破地震波在结构面的传播特性与结构面 倾角判断

王观石¹, 胡世丽¹, 李贵荣¹, 李世海²

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000; 2. 中国科学院 力学研究所, 北京 100193)

摘要: 地震波斜入射结构面时, 会产生2种不同类型的透射波, 引起波场极性变化。采用弹簧模型描述非充填型结构面, 运用弹簧模型讨论爆破地震波在结构面的传播特性。研究表明, 爆破地震波在结构面处的波形转换系数以及P, SV波峰值比和偏振角的变化规律均能有效反映结构面刚度和入射角变化。结合现场试验方案, 提出计算P, SV波峰值比和偏振角的方法, 建立偏振角与入射角和结构面透射系数的关系; 由现场试验数据得到空间各测点的P, SV波峰值比和偏振角的变化规律, 进而确定结构面倾角。现场试验结果表明, 根据各测点的P, SV波峰值比和偏振角变化规律可以准确确定结构面倾角。

关键词: 岩石力学; 结构面倾角; 地震波; 偏振角; 波形转换

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)09 - 1790 - 09

TRANSMISSION ATTRIBUTES OF BLASTING SEISMIC WAVE IN INTERFACE AND JUDGEMENT OF INTERFACE OBLIQUITY

WANG Guanshi¹, HU Shili¹, LI Guirong¹, LI Shihai²

(1. School of Architectural and Surveying and Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Seismic waves are converted into two different types of transmission waves such as P wave and SV wave when seismic wave oblique incident goes through the rock mass interface. At the same time, wave field polarity is altered by rock mass interface. The non-filling interface is simplified as a spring model. Propagation characteristics of blasting seismic wave are analyzed by the spring model. The results show that interface stiffness and the variation of incidence angle can be effectively reflected by waveform transformation of seismic wave in interface and variation of the ratio of peak amplitude values between P wave and SV wave and variation of polarization angle. The ratio of peak values between P wave and SV wave and polarization angle can be calculated by analyzing the field test results. The relationship between polarization angle and incidence angle and transmission coefficient of interface is studied. Interface obliquity can be calculated by analyzing the ratio of peak amplitude values between P wave and SV wave and variation of polarization angle of different survey points that are obtained by field experiment. The field experiment and theoretical results indicate that interface obliquity can be determined by the ratio of peak values between P wave and SV wave and variation of polarization angle at different survey points.

Key words: rock mechanics; interface obliquity; seismic wave; polarization angle; waveform transformation

收稿日期: 2010 - 03 - 29; **修回日期:** 2010 - 05 - 10

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(10632100); 国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BAB32B03)

作者简介: 王观石(1977 -), 男, 博士, 2000年毕业于南方冶金学院采矿工程专业, 现任讲师, 主要从事工程爆破与岩体力学等方面的教学与研究工。E-mail: wgsy010@126.com

1 引言

地震波在岩体中传播时, 不仅受到岩体密度、孔隙率和各种微结构等内部因素的影响, 同时还受到温度、湿度和外载荷等外部因素的影响, 在诸多的影响因素中, 岩体结构面是最直接、最突出的影响因素^[1]。有关结构面引起地震波发生波形转换、SV 波分裂和偏振方向变化等问题, 国内外已有大量研究。

随着油气田地质地球物理勘探难度的不断加大, 常规 P 波方法已经不能满足复杂构造成像的实际需要, SV, P 波的传播特性有所不同, 能够从另一个角度来反映岩体结构和材料参数, 但是 SV 波震源存在着价格昂贵、激发方法复杂等实际困难。而 P 波震源激发, 产生 P 波入射, 在岩体的传播过程中发生波形转换形成 SV 波, 于是提出了转换波勘探方法和三分量地震勘探技术^[2], 从而提高了构造解释、岩性解释、裂隙解释和油气藏识别的精度和油气田勘探开发成功率。近 10 余年来, 由于人们认识到地下各向异性对转换波资料处理质量的影响及其各向异性与地下裂隙发育程度和走向之间的关系^[3], 而地下裂隙与油气的富聚和运移密切相关, 并在利用转换波了解地下的岩性、物性、裂隙方位及裂隙密度等方面取得许多研究成果。尽管转换波理论已经逐渐成熟, 特别是在各向异性^[4], 射线追踪^[5]和叠前深度偏移^[6]方面, 但实际应用能力的不足制约了理论的进一步发展, 包括对各种不同因素的相互影响考虑不足。

由于岩体中含有大量结构面, 使岩体表现出明显的各向异性, 导致地震波的波速和衰减与传播路径有密切关系^[7], 根据反射走时, 可以有效反演节理产状^[8]。SV 波穿过各向异性介质时会产生分裂现象, 当 SV 波斜入射裂隙介质后, 就分裂成 2 种不同性质的波, SV 波分裂与上地壳中的微裂隙定向排列有关^[9]。SV 波分裂对地壳应力比较敏感^[10], 在各向异性岩层中, SV 波分裂成 2 个相互垂直的、速度不同的偏振波, 近似垂直入射时, 快波的偏振方向沿着最大水平压应力的方向, 这个特性可用来监测地震活动期间区域应力场的变化。在短周期三分量地震图上, 对来自不同传播方向的, 与可靠到

时的 SV 波偏振是一致的^[11]。尽管对地震体波走时及 P 波动力学特征来讲, 弱裂隙各向异性的影响可以忽略, 但与各向同性介质中的 SV 波相比, 即使对弱裂隙介质, 穿透其中的 SV 波的偏振特征也表现为 SV 波在入射面内的振动与垂直入射面内振动的相互耦合^[12]。由对孤立的小震群 SV 波分裂的观测解释, 发现较大地震前后, SV 波分裂快波偏振和快、慢波之间的到时差随时间变化能够用应力方向和大小的变化所导致裂隙形态的变化作出解释, 进一步证实了裂隙介质对 SV 波的分裂效应^[13]。实测的地震波波形, 由于 P 波、SV 波的相互干涉、叠加及干扰因素的影响, 使得记录的地震波场非常复杂, 要从其中识别分裂后的快、慢 SV 波极为困难。

岩体中由于结构面的存在导致地震波场复杂, 给通过波场分析来了解岩体结构带来很大的困难。本文通过分析地震波在结构面的传播特性, 找出能够反映结构面倾角和刚度的参数, 为地震波探测岩体基本结构提供依据。研究结果^[14]表明, 当黏性系数较小时, 介质的黏性对结构面的传播特性影响很小, 因此本文在讨论地震波在结构面传播过程时, 把介质简化为弹性介质。

2 地震波在结构面的透射特性

2.1 P, SV 波在结构面的透射和反射

对于岩体的节理、裂隙等硬性结构面通常可以描述为弹簧, 把结构面看成是具有位移间断的两弹性半空间的接触面, 认为结构面没有厚度, 接触面间的相互作用通过弹簧刚度来反映, 结构面处应力连续, 位移间断, 如图 1 所示, 图中 P_i 和 SV_i 分别为入射 P 波和 SV 波, P_r 和 SV_r 分别为反射 P 波和 SV 波, P_t 和 SV_t 分别为透射 P 波和 SV 波, 由此得到地震波在结构面的透、反射系数计算公式^[15]。

令

$$A = \{-K_n \cos \theta_1, K_n \sin \beta_1, -K_n \cos \theta_2 + i\omega Z_{p2} \cos(2\beta_2), K_n \sin \beta_2 - i\omega Z_{s2} \sin(2\beta_2)\} \quad (1)$$

$$B = \left\{ -K_s \sin \theta_1, -K_s \cos \beta_1, K_s \sin \theta_2 - i\omega \frac{Z_{s2}^2}{Z_{p2}} \sin(2\theta_2), \right.$$

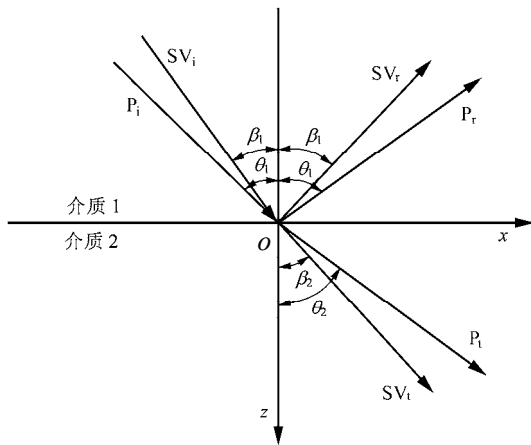


图1 地震波在结构面的透射和反射

Fig.1 Transmission and reflection of seismic waves in rock mass structure

$$\left. \begin{matrix} K_s \cos \beta_2 - i\omega Z_{s2} \cos(2\beta_2) \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

$$C = \left\{ -Z_{p1} \cos 2\beta_1, Z_{s1} \sin(2\beta_1), Z_{p2} \cos(2\beta_2), -Z_{s2} \sin(2\beta_2) \right\} \quad (3)$$

$$D = \left\{ \frac{Z_{s1}^2}{Z_{p1}} \sin(2\theta_1), Z_{s1} \cos(2\beta_1), \frac{Z_{s2}^2}{Z_{p2}} \sin(2\theta_2), Z_{s2} \cos(2\beta_2) \right\} \quad (4)$$

则有

$$P = \{A, B, C, D\}^T \quad (5)$$

式中: K_n 和 K_s 分别为结构面的法向刚度和切向刚度; ω 为角频率; θ_1, θ_2 分别为 P 波的入射角和透射角; β_1, β_2 分别为 SV 波的反射角和透射角; Z_{p1}, Z_{p2} 分别为介质 1 和介质 2 的 P 波阻抗; Z_{s1}, Z_{s2} 分别为介质 1 和介质 2 的 SV 波阻抗。

当 P 波入射时, 式(5)可改为

$$P = \begin{matrix} \begin{matrix} R_{pp} \\ R_{ps} \\ T_{pp} \\ T_{ps} \end{matrix} \\ \begin{matrix} -K_n \cos \theta_1 \\ K_s \sin \theta_1 \\ Z_{p1} \cos(2\beta_1) \\ \frac{Z_{s1}^2}{Z_{p1}} \sin(2\theta_1) \end{matrix} \end{matrix} \quad (6)$$

式中: R_{pp}, R_{ps}, T_{pp} 和 T_{ps} 分别为 P 波入射时的 P, SV 波的反射系数以及 P, SV 波的透射系数, 且 $\beta_1, \beta_2, \theta_1$ 和 θ_2 应满足:

$$\sin \theta_1 = \frac{C_{p1}}{C_{s1}} \sin \beta_1 = \frac{C_{p1}}{C_{p2}} \sin \theta_2 = \frac{C_{p1}}{C_{s2}} \sin \beta_2 \quad (7)$$

式中: C_{p1} 和 C_{s1} 分别为介质 1 和 2 反射 P 波和 SV 波的波速。

如果已知结构面刚度 K_n, K_s 以及入射角和岩石的波阻抗, 由式(5)~(7)就可以计算 P 波入射时的透射系数和反射系数。

当 SV 波入射时, 式(5)可表示为

$$P = \begin{matrix} \begin{matrix} R_{sp} \\ R_{ss} \\ T_{sp} \\ T_{ss} \end{matrix} \\ \begin{matrix} K_n \sin \beta_1 \\ K_s \cos \beta_1 \\ -Z_{s1} \sin(2\beta_1) \\ Z_{s1} \cos(2\beta_1) \end{matrix} \end{matrix} \quad (8)$$

式中: R_{sp}, R_{ss}, T_{sp} 和 T_{ss} 分别为 SV 波入射时的 P, SV 波的反射系数以及 P, SV 波的透射系数; 且 $\beta_1, \beta_2, \theta_1, \theta_2$ 应满足:

$$\sin \beta_1 = \frac{C_{s1}}{C_{p1}} \sin \theta_1 = \frac{C_{s1}}{C_{p2}} \sin \theta_2 = \frac{C_{s1}}{C_{s2}} \sin \beta_2 \quad (9)$$

如果已知结构面刚度 K_n, K_s 以及入射角和岩石的波阻抗, 由式(5), (8)和(9)就可以计算 SV 波入射时的透射系数和反射系数。

2.2 地震波在结构面的传播特性分析

由式(5)~(9)可以知道, 影响地震波在结构面的传播特性的因素有结构面刚度、频率和岩石的波阻抗, 为此, 采用量纲一的量 $K/(\omega Z)$ 讨论地震波在结构面的传播特性^[16], 得出能够反映结构面倾角的参数。在以下讨论中, 岩石的材料参数为弹性模量 $E = 40 \text{ GPa}$; 密度 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$; 泊松比 $\nu = 0.25$ 。设结构面刚度 $K_n = K_s = K = 2.0 \times 10^8 \text{ Pa/m}$, 改变设入射波频率, 讨论结构面对地震波传播的 3 个方面的影响: (1) 波形转换; (2) P, SV 波峰值比变化; (3) 偏振角。

2.2.1 波形转换

当地震波的斜入射角结构面时, P 波在结构面有一个透射系数 T_{ps} , 即 P 波会转换为 SV 波, 同样 SV 波也会转换为 P 波。由式(5)~(7)可得 P 波在结构面的透射系数 T_{ps} 与 $K/(\omega Z)$ 和入射角的关系, 如图 2(a)所示。由图 2(a)可知, $K/(\omega Z)$ 值增大, 透射系数 T_{ps} 减小。入射波为 SV 波时, 由式(5), (8)和(9)可得到透射系数 T_{sp} 的变化关系, 如图 2(b)所示。由

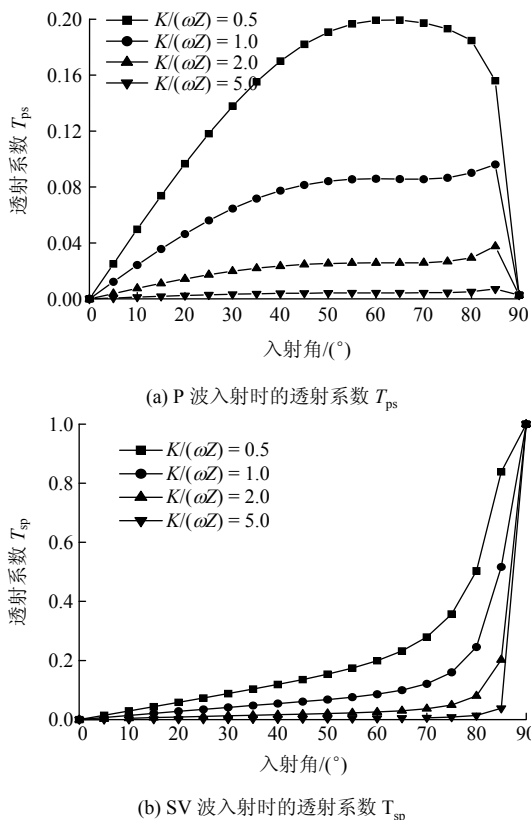


图 2 P, SV 波入射时的透射系数

Fig.2 Transmission coefficients of P and SV waves incident

图 2(b)可知, 入射角增大, 透射系数 T_{sp} 增大, 当入射角为 90° 时, $T_{sp} = 1$; $K/(\omega Z)$ 值增大, 透射系数 T_{sp} 减小。如果入射波场有 P, SV 波, 就存在 P, SV 波的波形相互转换问题, 为讨论这一问题, 定义转换系数 $T_c = T_{ps} - T_{sp}$, 由式(5)~(9)可得 T_c 与结构面刚度和入射角的关系, 如图 3 所示, 由图 3 可知: $K/(\omega Z)$ 值减小, 波形转换更突出; 存在一个临界入射角 $\theta_{cr} = 60^\circ$, 当 $0 < \theta \leq 60^\circ$ 时, $0 < T_c$, 即 P 波转换为 SV 波的能量更多, 但由于 T_c 很小, 特别是对于低频地

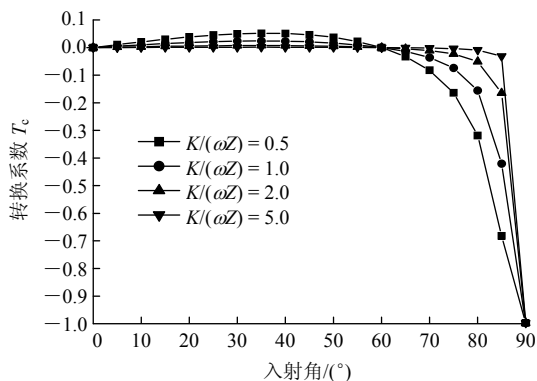


图 3 转换系数 T_c 与结构面刚度和入射角的关系

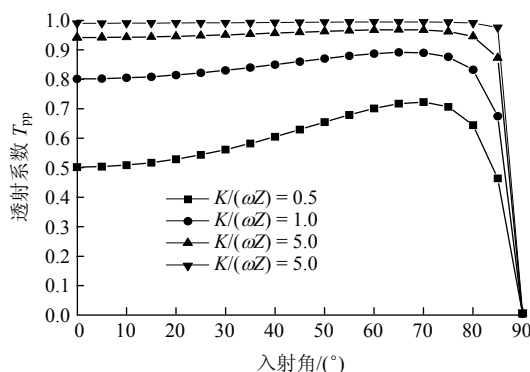
Fig.3 Relationships between conversion coefficient T_c and interface stiffness and incidence angle

震波, 在这个范围内, 可以不考虑波形的相互转换; $60^\circ < \theta$, $T_c < 0$, 即 SV 波转换为 P 波的能量更多, 当入射角 $70^\circ < \theta \leq 90^\circ$, SV 波的震动会明显增强; 当入射波频率满足 $K/(\omega Z) > 5$ 且入射角 $\theta < 85^\circ$, T_c 的最大值为 0.03, 只有入射角接近 90° , 波形转换问题才比较突出。

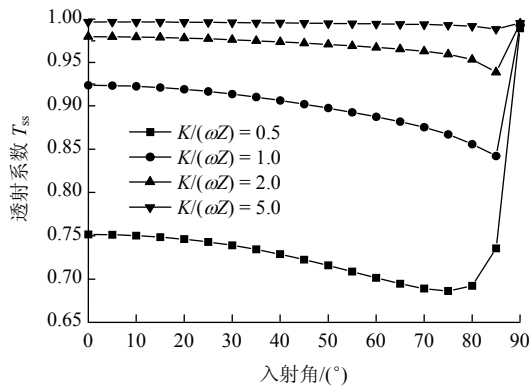
综上所述可得, 地震波频率对波形转换影响很大, 主要体现为 2 个方面: (1) 低频地震波, 如当频率满足 $K/(\omega Z) > 5$, 可以不考虑波形转换。(2) 对于高频地震波, 波形转换系数是分析结构面刚度的一个有效参数, 入射角由 0° 增加到 40° , 转换系数随入射角增大而增大, 即 P 波的能量增加; 入射角由 40° 增加到 90° , 转换系数减小, 即 SV 波的能量增加。因此, 可以根据波形转换系数的频率特性分析结构面刚度和入射角, 但由于转换系数小, 从波形也很难识别, 导致实际应用还是非常困难的。

2.2.2 P, SV 波峰值比变化

由式(5)~(7)可得 P 波入射时的透射系数 T_{pp} , 如图 4(a)所示, 当入射波频率满足 $K/(\omega Z) > 5$ 时, 透射系数 T_{pp} 接近 1; $K/(\omega Z)$ 值减小, 透射系数 T_{pp} 减小, 入射角对透射系数的影响越大。由式(5), (8)和(9)可得 SV 波入射时的透射系数 T_{ss} , 如图 4(b)所示, 此时 $K/(\omega Z)$ 值减小, 透射系数 T_{ss} 减小。当入射角 $\theta < 70^\circ$ 和 $K/(\omega Z) > 0.5$ 时, 波形转换系数 $T_c < 0.05$, 如果不考虑转换系数对波形的影响, 影响透射波波形的就是透射系数 T_{ps} 和 T_{sp} 。由图 4 可知, P, SV 波在同一个结构面对应的透射系数 T_{ps} 和 T_{sp} 不同, 这会导致经过结构面后 P, SV 波的峰值比发生变化。现定义 P, SV 波的峰值比变化系数 $A_f = T_{pp}/T_{ss}$, A_f 与 $K/(\omega Z)$ 和入射角关系如图 5 所示, 可知 $K/(\omega Z)$ 值越小, P, SV 波的峰值比会随入射角变化而变化越大, 入射角为 $0^\circ < \theta < 70^\circ$, 随入射角增大, A_f 增加, 即 P 波相对于 SV 波峰值增大; 当 $70^\circ < \theta$, 随入射角增大, A_f 减小, 即 P 波相对于 SV 波峰值减



(a) P 波入射时的透射系数 T_{pp}



(b) SV 波入射时的透射系数 T_{ss}
图 4 P, SV 波入射时的透射系数

Fig.4 Transmission coefficients of P, SV waves incident

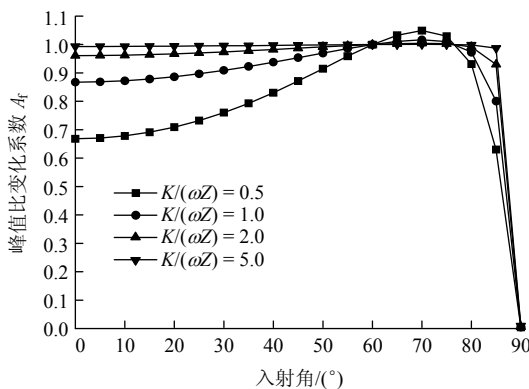


图 5 峰值变化系数 A_r 与结构面刚度和入射角的关系
Fig.5 Relationships between variation coefficient of amplitude (A_r) and interface stiffness and incidence angle

小；当入射波频率满足 $K/(\omega Z) > 5$ 时，P, SV 波的峰值比随入射角变化很小。

由于 $K/(\omega Z)$ 为量纲一的量，结构面刚度、入射波频率或岩石的波阻抗的变化都会改变该量纲一的值，频率增大，该无量纲量的值减小，导致 P, SV 波的透射系数发生变化，进而改变 P, SV 波的峰值比，由图 5 可知，入射角改变时，高频 P, SV 波的峰值比有明显变化，因此选择合适频率的 P, SV 波，在已知震源位置条件下，其峰值比变化也是分析结构面刚度和入射角的一个有效参数。

2.2.3 偏振角变化

由于 P, SV 波在相同的结构面透射系数 T_{ps} 和 T_{sp} 不同，也会导致质点的偏振方向发生变化，可以用偏振角来描述偏振方向变化。设 P, SV 波的入射角相同，结构面两侧的岩性相同，不考虑转换波，质点偏振方向如图 6 所示。质点的振动是由 P, SV 波共同激发而形成的，即实际振动方向是由两个振动合成决定的，设入射 P, SV 波的振动幅值为单位 1，由此可得

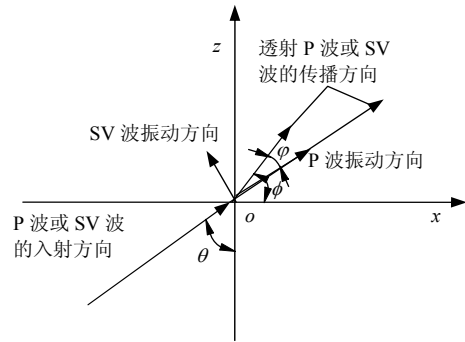


图 6 质点的偏振方向
Fig.6 Polarization orientation of particle

$$\tan \varphi = \frac{T_{ss}}{T_{pp}} \quad (10)$$

式中： φ 为偏振方向与传播方向的夹角。

现定义质点的偏振方向与 x 方向的夹角 ϕ 为偏振角。由图 6 可以得到

$$\phi = 90^\circ - \theta + \arctan \frac{T_{ss}}{T_{pp}} = 90^\circ - \theta + \arctan \frac{1}{A_r} \quad (11)$$

式(11)是假设 P, SV 波的偏振方向如图 6 所示的条件下得到的，实际计算时，需根据实际偏振方向来确定。式(11)的左边可以由试验数据计算得到，右边是有关结构面透射系数和入射角的函数，因此，该式可以用于分析结构面参数。由式(11)可得入射角与偏振角的关系，如图 7 所示，从图 7 可以得到：入射角存在一个临界角，当 $K/(\omega Z) = 0.5$ 时，临界角为 70° ，入射角 $\theta = 0^\circ \sim 70^\circ$ 时，随入射角增大，偏振角 ϕ 减小，入射角 $\theta > 70^\circ$ 时，随入射角增大，偏振角 ϕ 增大；入射角的临界角与 $K/(\omega Z)$ 值的大小有关， $K/(\omega Z)$ 值越大，临界角越大。

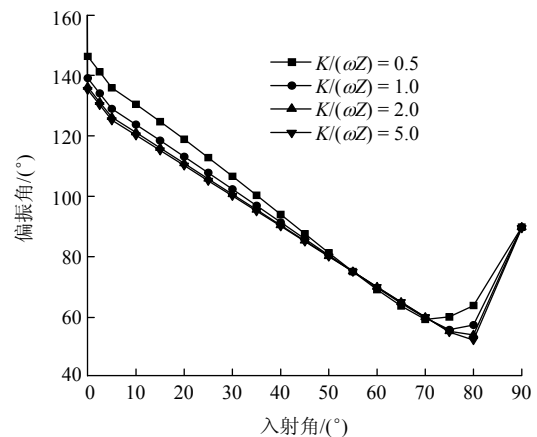


图 7 偏振角与入射角的关系
Fig.7 Relationships between polarization angle and incidence angle

3 现场试验确定结构面倾角

3.1 试验方案

地震波在结构面的传播特性的分析表明: 根据 P, SV 波的峰值比和偏振角的变化规律可以判断入射角的变化, 进而判断结构面的倾角, 如果进行不同方位的试验就可以判断结构面的倾向和倾角。为验证上述规律的有效性, 在江西德兴铜矿露天采场进行了现场试验, 试验方案如图 8 所示, 在岩体中钻孔, 孔内爆破, 地表布置加速度传感器, 二分量传感器的 x 方向与传感器走向一致, z 方向为垂直方向。传感器参数: 电荷灵敏度为 $10.427 \sim 14.091 \text{ pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$; 频响范围为 $0.2 \sim 5 \text{ kHz}$; 谐振频率为 15 kHz 。震动信号经信号调理仪进行滤波处理后再用北京东方振动与噪声技术研究所生产的 INV306 振动采集仪采集振动信号, 信号调理仪设置为低通 3 kHz , 采样率为 12 kHz 。水压爆破的药量为 40 g 。

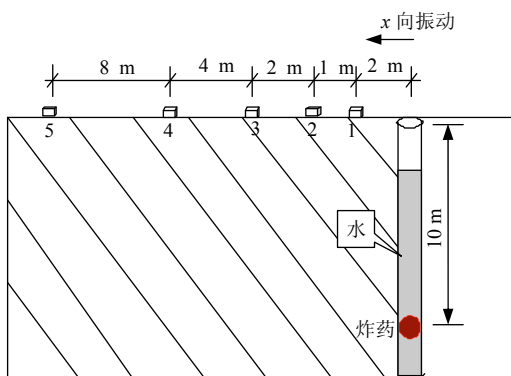


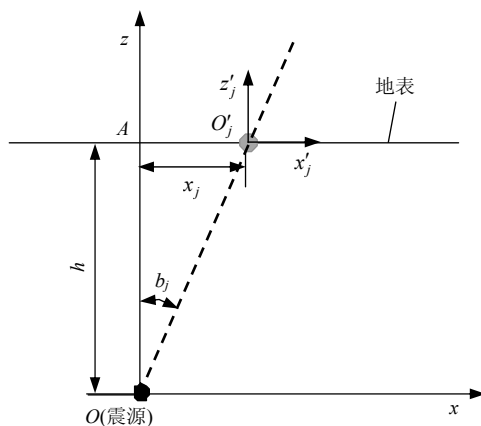
图 8 现场试验示意图
Fig.8 Layout scheme of field test

共进行了 3 次重复试验, 孔内水面与地表距离为 2 m , 试验发现, 进行水压控制爆破, 岩体未破坏, 试验数据具有很好的重复性。试验数据的处理分为 2 个部分: 第一部分为计算 P, SV 波的峰值比, 步骤包括波场分离和计算峰值比; 第二部分为计算偏振角。

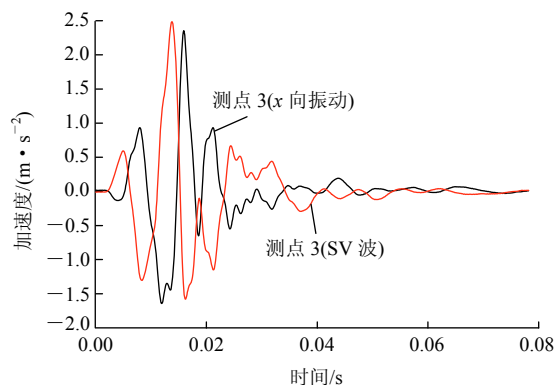
3.2 试验数据处理

3.2.1 P, SV 波的波场分离

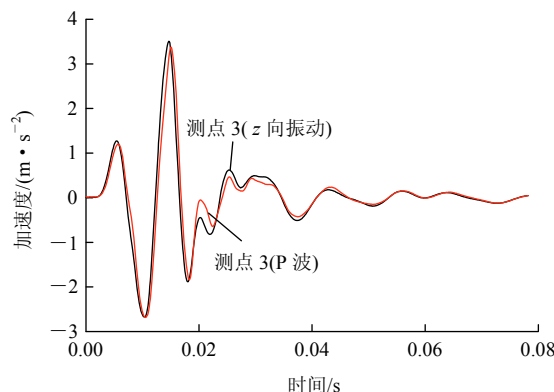
为便于分析波场分离, 将爆破试验图简化。P, SV 波的波场分离图见图 9(a)。点 O 为震源, 点 O'_j 为第 j 个传感器。设震源的深度为 h , 即点 O, A 间的距离为 h ; 第 j 个传感器与孔口距离为 x_j , 即点 O'_j, A 间的距离为 x_j 。根据 P 波的特性可以认为沿着



(a) 示意图



(b) 分离得到的 P 波



(c) 分离得到的 SV 波

图 9 P, SV 波的波场分离

Fig.9 Field separation of P wave and SV wave

$\overline{OO'_j}$ 方向震动的波为 P 波, 与 $\overline{OO'_j}$ 方向相互垂直震动的波为 SV 波, 故有

$$\left. \begin{aligned} a_{pj} &= a_{zj} \cos b_j + a_{xj} \sin b_j \\ a_{sj} &= a_{xj} \cos b_j - a_{zj} \sin b_j \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中,

$$\tan b_j = \frac{x_j}{h} \quad (13)$$

式中： a_{pj} 和 a_{sj} 分别为第 j 个传感器所在位置的 P, SV 波振动加速度； a_{xj} 和 a_{zj} 分别为第 j 个传感器所记录 x, z 方向的加速度波形。

按照式(12)进行波场分离，测点 3 的波场分离得到的 P 波和 SV 波如图 9(b), (c)所示。可看出， x 方向振动与分离得到的 SV 波有明显变化(如图 9(b)所示)，分离得到的 P 波与 z 方向的振动没有明显变化(如图 9(c)所示)。由于震源至各测点的传播距离不同，造成波阵面的扩散程度不同，球面波的波阵面扩散系数为 $1/R$ (R 为波阵面半径)，为消除波阵面扩散造成 P, SV 波峰值比的影响，各测点的 P, SV 波峰值比乘以一个修正系数 R_i/R_1 ($i=1, 2, 3, 4, 5$, R_i 表示第 i 个测点与震源的距离)。修正后的 P, SV 波峰值比如图 10 所示。

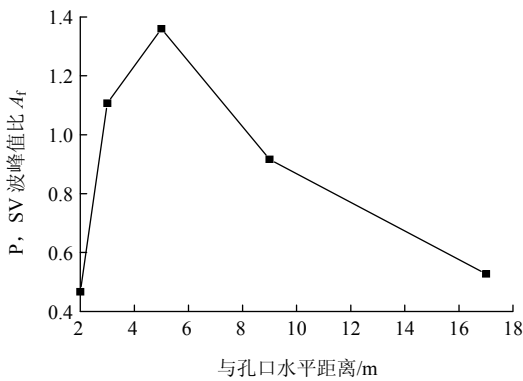


图 10 修正后 P, SV 波峰值比 A_f

Fig.10 Variation of ratios of amplitude A_f between P wave and SV wave after modification

3.2.2 偏振角的计算

试验记录得到一系列随时间变化的振动加速度离散点，在离散点上划出一时窗 $[t_1, t_2]$, $t_2 - t_1 = N\Delta t$, Δt 为采样间隔。设时窗中第 i 个样点的加速度矢量为 D_i ，其坐标为 (a_{xi}, a_{zi}) ，则该样点的偏振角为

$$\phi_i = \arctan \frac{a_{zi}}{a_{xi}} \quad (14)$$

求时窗内 ϕ_i 的平均值，即

$$\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (15)$$

测点 3 的偏振方向随时间变化如图 11 所示，箭头指示的方向为时间增加过程，可以看出，在整个振动过程中，偏振方向会随时间发生变化，这是由于地震波传播至地面后发生反射形成瑞利波，瑞利

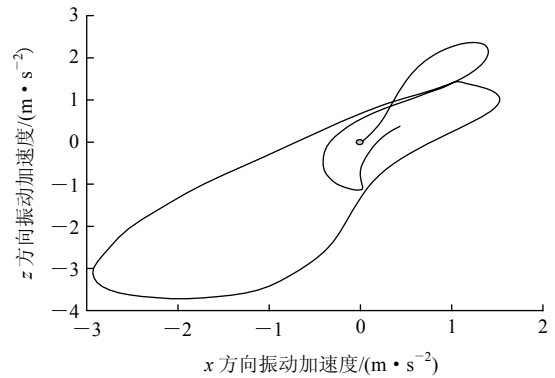


图 11 测点 3 的时域偏振变化

Fig.11 Variation of time-domain polarization of survey point 3

波在地表传播时受到地表岩体结构的影响，导致偏振方向发生变化，为了减少这种影响，本文以起跳至第一波峰(如果第一波峰很小时，也可以是最大波峰)所确定的偏振角为该测点的偏振角。按照式(15)计算得到各测点的偏振方向和偏振角如图 12 所示。

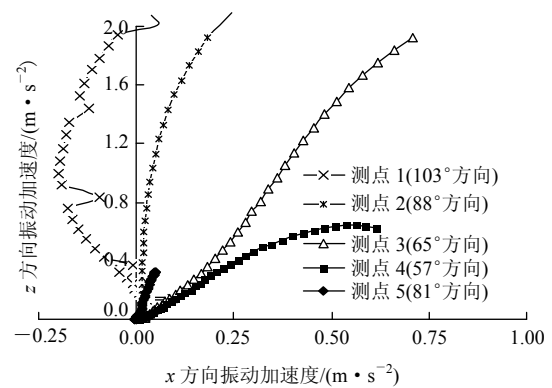


图 12 各测点的偏振方向

Fig.12 Polarization orientations of various survey points

3.3 试验数据分析讨论

从图 12 可以看出，从测点 1~4，随着测点与孔口距离增大，偏振角减小，测点 5 相对于测点 4，偏振角增大，由此可以判断地震波传播至测点 4 的入射角为临界角。从图 7 可以知道，结构面刚度会影响临界角的大小，但影响不大。5 个测点的第一特征频率为 83~142 Hz，结合岩体中非充填型结构面刚度大小^[17]，根据特征频率确定临界角为 70°，根据测点 4 与震源的空间位置关系可以计算得到结构面的倾角为 65°，如果想得到更准确的结论，需要布置更多的传感器。试验完成之后，进行采矿爆破作业，从揭露的露头来看，结构面倾角为 60°，实际岩体结构面的倾角与据偏振角得到的结论是一致的，采矿揭露的露头如图 13 所示。



图 13 爆破作业揭露的露头

Fig.13 Layout of outcrop caused by blasting

如果从 P, SV 波峰值比来判断, 图 12 可以知道在测点 3 处 P, SV 波的峰值比达到最大, 由图 5 可知, 入射角为 70° 时 P, SV 波的峰值比达到最大, 据此判断测点 3 处的入射角为 70° , 由此计算得到结构面倾角为 7° , 这与露头揭示的情况是不符的, 其原因可以从图 4(a)来说明, 入射角为 90° 时透射系数 $T_{pp} = 0$, 表明地震波不穿过结构面, 而是平行结构面向前传播, 不发生波转换。爆破气体高速膨胀, 主要产生 P, SV 波主要是 P 波在传播过程中发生波形转换产生的, 由此得到: 当地震波传播方向与结构面倾向一致时, P, SV 波峰值比最大, 由此得到结构面的倾角为 63° , 与露头的结构面倾角一致。

4 结 论

运用 L. J. Pyrak-Nolte^[15]建立的地震波在结构面传播模型, 讨论了地震波在结构面处的传播特性, 提出了根据 P, SV 波的峰值比和偏振角随传播距离的变化规律分析岩体结构面倾角的方法, 具体来说, 得到如下几点结论:

(1) 地震波在结构面会发生波形转换, 转换系数与量纲一的量 $K/(\omega Z)$ 有密切关系, 低频地震波, 可不考虑波形转换, 高频地震波, 波形转换系数是分析结构面刚度的有效参数, 入射角由 0° 增加到 40° , 转换系数也增大, 入射角由 40° 增加到 90° , 转换系数减小, 因此, 不仅可以由波形转换系数分析结构面刚度, 还可以作为分析入射角的参数。

(2) 由于 P, SV 波在结构面处的透射系数不同,

导致 P, SV 波的峰值比在结构面前后会发生变化, 而且峰值比还受入射角的影响, 频率越大, 影响越大, 因此选择合适频率的 P, SV 波, 其峰值比变化也是分析结构面刚度和入射角的一个有效参数, 并用现场试验数据验证了峰值比变化规律判断结构面倾角的有效性。

(3) 不同的入射角, 透射系数 T_{pp} 和 T_{ss} 也不同, 透射系数 T_{pp} 和 T_{ss} 不同会引起偏振角发生变化, 存在一个入射临界角, 当入射角小于临界角时, 随入射角增大, 偏振角 ϕ 减小; 当入射角大于临界角时, 随入射角增大, 偏振角 ϕ 增大; 临界角与 $K/(\omega Z)$ 值的大小有关, $K/(\omega Z)$ 值越大, 临界角越大, 因此偏振角的变化可以作为分析结构面刚度和入射角的参数, 这与现有的结论有所不同: 认为测点的偏振方向与结构面的方位基本一致。本文试验数据表明: 根据偏振角变化可以有效判断入射角, 结合测点与震源的空间位置关系就可以判断结构面倾角, 如果进行不同方位的试验, 就可以进一步判断结构面的方位角。

(4) 本文在假设结构面全连通的条件下建立 P, SV 波峰值比和偏振角随结构面刚度、入射角变化关系, 在满足结构面全连通时还可以用来分析结构面刚度, 从试验区来看, 并不完全满足结构面全连通条件, 因此要想更准确分析结构面刚度, 需要建立非全连通条件下建立 P, SV 波峰值比和偏振角随结构面刚度、入射角变化关系, 另外对波形的频率特性与岩体结构的关系有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] GAVIGLIO P. Longitudinal waves propagation in a limestone: the relationship between velocities and density[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, 22(4): 290 - 299.
- [2] STEWART R R, GAISER J E, BROWN R J, et al. Converted-wave seismic exploration: applications[J]. Geophysics, 2003, 68(1): 40 - 57.
- [3] 钱 辉, 彭苏萍, 勾精为, 等. 倾斜层转换波速度比分析和叠加——潘一煤层 P_s 波处理的实际应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 565 - 573.(QIAN Hui, PENG Suping, GOU Jingwei, et al. Analysis of velocity ratio and stacking technique for converted wave of dipping layers: practical application to P_s wave data processing of Panyi coal layers[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 565 - 573.(in Chinese))
- [4] 薛松涛, 谢丽宇, 陈 镨, 等. 平面 P-SV 波入射时 TI 层状自由场

- 地的响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 163 - 1 168. (XUE Songtao, XIE Liyu, CHEN Rong, et al. Dynamic analysis of response of transversely isotropic stratified media TI to incident P-SV waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 163 - 1 168.(in Chinese))
- [5] 赵爱华, 张中杰. 三维复杂介质中转换波走时快速计算[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 702 - 707.(ZHAO Aihua, ZHANG Zhongjie. Fast calculation of converted wave travel time in 3D complex media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 702 - 707.(in Chinese))
- [6] 谢飞, 常旭, 刘伊克. 火山地震屏蔽层的转换波叠前时间偏移成像[J]. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1 899 - 1 908.(XIE Fei, CHANG Xu, LIU Yike. Converted-wave pre-stack time migration in volcanic area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1 899 - 1 908.(in Chinese))
- [7] 叶根喜, 姜福兴, 郭延华, 等. 煤矿深部采场爆破地震波传播规律的微震原位试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1 053 - 1 058.(YE Genxi, JIANG Fuxing, GUO Yanhua, et al. Experimental research on seismic wave attenuation by field microseismic monitoring in a deep coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1 053 - 1 058.(in Chinese))
- [8] 许年春, 吴德伦, 赵明阶, 等. 节理产状的应力波反射法反演研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增2): 3 585 - 3 591.(XU Nianchun, WU Delun, ZHAO Mingjie, et al. Research on inversion of joint's attitude using reflected stress wave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.2): 3 585 - 3 591.(in Chinese))
- [9] CRAMPIN S. Calculable fluid-rock interactions[J]. Journal of the Geological Society, 1999, 156(5): 501 - 514.
- [10] 刘堃, 张中杰, 胡家富, 等. 中国陆区 S 波分裂的频带相关性及其意义[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(2): 155 - 161.(LIU Kun, ZHANG Zhongjie, HU Jiafu, et al. Study on frequency band correlation of S-wave splitting on mainland in China[J]. Science in China(Series D), 2001, 31(2): 155 - 161.(in Chinese))
- [11] 陈天长, 范军, 曾健. 四川地区 S 波偏振[J]. 四川地震, 1996, (4): 85 - 90.(CHEN Tianchang, FAN Jun, ZENG Jian. S-wave polarization in regions of Sichuan Province[J]. Earthquake Research in Sichuan, 1996, (4): 85 - 90.(in Chinese))
- [12] 姚陈, 雷军, 熊杨武. 弱裂隙各向异性对地震体波的效应[J]. 中国地震, 1997, 13(3): 232 - 240.(YAO Chen, LEI Jun, XIONG Yangwu. The effects of weak crack-induced anisotropy on seismic body waves[J]. Earthquake Research in China, 1997, 13(3): 232 - 240.(in Chinese))
- [13] YAO C, XIONG Y W. Shear-wave splitting from local earthquake modeled by synthetic seismograms[J]. Canadian Journal of Ophthalmology, 1993, 29(2): 324 - 331.
- [14] CARCIONE J M. Reflection and transmission of q_p - q_s plane waves at a plane boundary between viscoelastic transversely isotropic media[J]. Geophysical Journal International, 1997, 129(3): 669 - 680.
- [15] PYRAK-NOLTE L J. Seismic response of fractures and the interrelations among fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(8): 787 - 802.
- [16] CAI J G, ZHAO J. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 661 - 682.
- [17] 李宁, 陈蕴生. 岩体节理刚度系数的现场声波测试[J]. 应用力学学报, 1998, 15(3): 119 - 123.(LI Ning, CHEN Yunsheng. Field sonic test on rock mass joint stiffness coefficient[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1998, 15(3): 119 - 123.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 金属矿海底基岩开采岩石力学理论与实践;
- (2) 断层破碎带大断面巷道的安全监控与稳定性分析;
- (3) 脆性裂隙围岩的损伤力学分析及现场监测研究;
- (4) 岩石热破裂与渗透性相关规律的实验研究;
- (5) 深部沿空留巷围岩变形特征与支护技术;
- (6) 采动岩体的力学行为控制与采矿工程技术创新研究进展综述;
- (7) 锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究;
- (8) 基于非线性有限元的马吉拱坝整体稳定分析;
- (9) 特殊地质区域海底隧道长期稳定性研究。