

临界窗口外 S 波分裂的初步研究

刘希强 李清河* 李红

(山东省地震局, 济南 250021)

摘要 本文在详细讨论了自由界面对入射 S 波的影响的基础上, 首次提出一种对临界窗口之外的 S 波分裂资料的处理方法。首先对径向和竖向记录资料进行振幅和相位修正, 进而利用最大特征值和波形识别算子法(刘希强, 1992)对资料进行分析。利用本文提出的方法对天水爆破资料进行了分析, 结果表明, 爆破资料显示了比较明显的 S 波震相, 且产生了明显的 S 波分裂。

关键词: S 波分裂 自由界面 SH 波 SV 波 各向异性介质

1 引言

近年来关于 S 波分裂的研究引起了国内外学者的极大兴趣和广泛关注^[1-4]。但是, 观测 S 波分裂受许多条件的限制, 特别是受观测范围的限制, 对于均匀泊松介质, 观测 S 波的窗口范围仅限制在临界角为 35.6° 围成的锥形区域内。因此, S 波窗口对可利用的资料限制太大, 人们只能直接着眼于窗口内记录资料的波形分析。加之地震的突发性, 使我们难以将大量的观测仪器置于孕震区, 也就不能及时获得孕震过程的信息。能不能突破 S 波窗口的限制, 对窗口之外的三分量数字记录波形进行分析, 以获得孕震的信息, 这是本文所探讨的问题。

2 自由界面对 S 波分裂的影响

地壳中存在的裂隙大都是竖向裂隙, 快、慢 S 波分别在平行和垂直于裂隙的平面中传播。严格来说, 快、慢 S 波既非 SH 型, 亦非 SV 型, 只有在特殊传播方向上才有可能属于标准 SH 型和 SV 型。但仅考虑自由界面对入射 S 波的影响, 可把各向异性介质中产生的快 S 波和慢 S 波入射到界面上的变化情况近似等效为各向同性介质中入射 S 波的 SV 和 SH 分量的变化。在直角坐标系中取自由界面为 R-T 平面, 即径向和切向分量构成的平面, 与其垂直的平面为 T-V 平面, 即切向和竖向分量构成的平面。

地震信号不是单一频率的信号, 但我们可以其卓越频率作为主要动力学特征, 这样可考虑单一频率波入射到自由界面上的效应。设入射波入射到界面上后引起的地面位移在指定坐标系下对应入射角 j 的径向振幅为 $R(j)$ 、竖向振幅为 $V(j)$ 、切向振幅为 $T(j)$, 并假定入射到自由界面的 S 波的 SV、SH 分量的振幅是 1。图 1 给出了入射 SV 波传播、振动方向及反射波传播、振动方向。从运动方程出发, 利用边界条件可得反射系数、上行及下行 SV 波和 P 波

* 国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

位移^[5], 据此得反射 P 波在指定坐标系下的位移表达式:

$$\vec{D}_{p(r)} = [\sin(i_p), 0, ish(\gamma)] \times \hat{s}_p \times exp[-\frac{z\omega}{\alpha} \times sh(\gamma)] \times exp[i\omega(P \vec{x} - t)] \quad (1)$$

其中 P 为波慢度; i_p 为反射角; \hat{s}_p 为反射系数(表达式略); $Z = C^2 + P^2 Y$ (其中 $C = \frac{1}{\beta} - 2P$, $Y = 4 \times \cos(i) \times \cos(j) / \alpha^2$, α, β 分别为 P 波和 S 波速度); ω 为频率; \vec{x} 为 P 波位移。可以看出, 当大于临界角入射时, 反射 P 波变为非均匀波, 沿表面传播, 它的振幅随 Z 的增大而呈现指数规律衰减, 其传播速度为 $\frac{\alpha}{sh(\gamma)}$ (因 i_p 为复角,

可设 $i_p = \frac{\pi}{2} - i\gamma (\gamma > 0)$, 并且存在相移, 水平分量相移为 $phase(\hat{s}_p)$, 垂直分量相移为 $\frac{\pi}{2} + phase(\hat{s}_p)$ 。因而非均匀 P 波运动的垂直分量相位比水平分量相位大 $\frac{\pi}{2}$, 为相位滞后。

反射 SV 波在指定坐标系下的位移为:

$$\vec{D}_{sv(r)} = [\cos(j), 0, -\sin(j)] \hat{s}_s \exp \cdot [i\omega \frac{\sin(j)}{\beta} x + \frac{\cos(j)}{\alpha} \cdot Z - t] \quad (2)$$

其中 \hat{s}_s 为反射系数(表达式略)。可以看出, 反射 SV 波的振幅并不随深度而衰减, 故反射 SV 波只产生相移, 由于 $\cos(i)$ 有正的虚部, 因而反射系数是负的, 与入射波的波形相比属相位超前。

入射波和反射波在指定坐标系下的合成位移分量分别为:

$$R(j) = \frac{2\sqrt{3} \times \cos(2j) \times \cos(j)}{\cos^2(2j) + 4\cos(i) \times \sin^2(j) \times \cos(j)} \quad (3)$$

$$V(j) = \frac{4\cos(i) \times \cos(j) \times \sin(j)}{\cos^2(2j) + 4\cos(i) \times \sin^2(j) \times \cos(j)} \quad (4)$$

由于入射 S 波 SH 分量的振动方向和入射到自由界面所产生的反射波振动方向相同, 都是沿 T 轴方向振动, 则地面记录到的振幅是原入射振幅的两倍, 即

$$T(j) = 2 \quad (5)$$

考虑关系式

$$\sin(i) = \frac{\alpha}{\beta} \times \sin(j) \quad (6)$$

式中 α, β 分别为 P 波和 S 波速度, 可以看出, 当 $\frac{\alpha}{\beta} \times \sin(j) > 1$ 时, $\sin(i) > 1$, 则 $\cos(i)$ 变为复数。

显而易见, 当入射角小于临界角时, 其地面自由位移的振幅为实数, 没有相位的变化, 只有振幅的变化; 当入射角大于临界角时, 其振幅和相位都发生了变化。图 2 和图 3 分别给出了 S 波窗口内、外振幅和相位的变化(对应均匀弹性介质, 临界角为 35.6°)。

综上所述, 自由界面对入射 S 波的影响效应为:

(1) 在 S 波窗口内, 对于震源激发的 S 波在各向异性介质中传播所产生的快、慢 S 波, 当

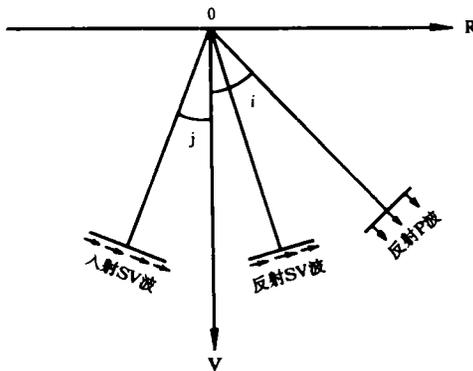


图 1 在固体弹性半空间自由表面入射的入射波及反射波

Fig. 1 Incident and reflected waves which travel in elastic half-space and arrive at free surface.

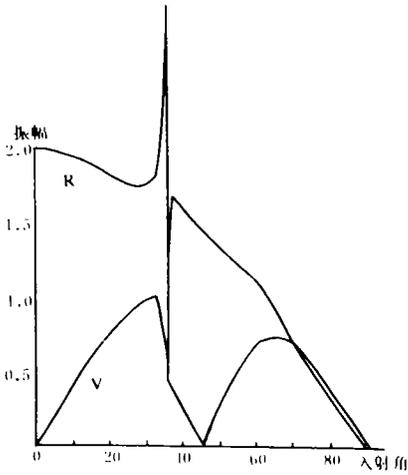


图 2 自由界面对入射 S 波 SV 分量的振幅的影响

Fig. 2 The effects of free-surface on the amplitude of SV component of incident shear-wave.

SH 型波入射到自由界面上时,其界面的位移仍在切向方向上,振幅变为原入射振幅的两倍,记录波形和原入射波形相比是同相的;当 SV 型波入射时,其自由界面位移由径向和竖向分量决定,径向振幅变为原入射振幅的 0—1.1 倍。因此,自由界面对入射波的影响表现在振幅上,径向记录集中了入射 SV 型波的主要能量,将三分向特别是把水平面内两道记录结合,研究 S 波的偏振和延迟性质不会失去原入射波的信息。

(2)在 S 波窗口之外,地面对 SH 型波的影响效应同上述一样,而 SV 型入射波却发生了振幅和相位两方面的变化。

3 消除自由界面影响的方法及应用

由以上可见,在 S 波窗口之外,地面对入射 SH 型和 SV 型波的影响效应是截然不同的,因此,需要消除这一影响效应,作者认为对振幅和相位分别进行矫正是行之有效

的方法。为说明问题起见,不妨假设一正弦波 $A\sin(\omega t)$ 入射到界面上,经自由界面作用后变成了余弦波 $B\cos(\omega t)$,做下列变换:

$$\frac{A}{B} \times B\cos[\omega(T \pm T_0)] = \frac{A}{B} \times \times B\cos(\omega T \pm \frac{\pi}{2}) = \mp A\sin(\omega t) \quad (7)$$

显而易见,通过对 $B\cos(\omega t)$ 的振幅和相位矫正,使 $B\cos(\omega t)$ 变成了 $A\sin(\omega t)$ 。(7)式中将时间滞后或提前对正弦或余弦的振动步调来讲实际上是进行了相位的矫正。对于各向异性介质产生的快、慢 S 波入射到地面上的情况,可以认为其相应的影响效应近似成立。那么可对不同入射角入射波形进行振幅和相位矫正,从而达到恢复入射波形信息的目的。据自由界面对入射波的影响曲线(图 2、图 3),可把入射角划分为 3 个区间,在不同区间范围内分别进行相应矫正。下面分别论述:

(1)当 SV 型波以小于临界角的角度入射时,由于水平面内的径向分量集中了入射波的主要能量,或者说水平面内的二分向数字化记录波形集中了入射波的主要能量,此时,可将竖向分量忽略,只考虑水平面内的两道记录波形来研究 S 波分裂。

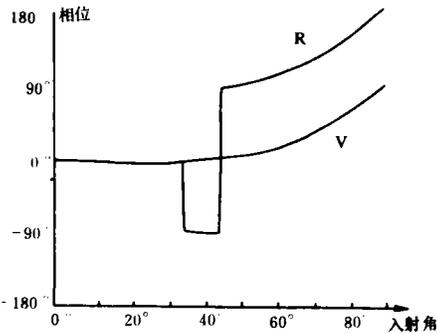


图 3 自由界面对入射 S 波 SV 分量的相位影响

Fig. 3 The phase effects of free-surface on the phase of SV component of incident shear-wave.

(2)对于S波以 40° — 60° 角度入射的情况,从图3可以看出,竖向记录在此区间发生了 0 — 15 度的相移,如果忽略这一相移的变化,可将竖向记录进行振幅矫正后代替径向记录来研究S波分裂。

(3)对于以 60° — 90° 角入射的SV型波,需对径向或竖向记录进行振幅和相位两方面的矫正。

以上所述振幅的矫正方法是将(1)和(2)式中对应不同入射角的 $R(j)$ 和 $V(j)$ 放大 $\frac{2}{R(j)}$ 或 $\frac{2}{V(j)}$ 倍;相位矫正是根据入射角对应位相的超前或滞后(图3)来确定原始径向或竖向记录分量采样点的提前或滞后。采样点提前或滞后的多少需据采样率、不同入射角对应的相移以及S波的周期来确定。

需要说明的是,本文中提及的径向、横向、竖向三分向是根据入射波的偏振面来划分的,应对现有记录(如东西、南北、垂直)方式进行坐标系的旋转。据S波分裂产生的机制,作者认为将水平面内的二分向记录中的某一方向旋转到区域最大主压应力方向上为好,这是因为快S波是沿裂隙优势方向也即最大主压应力方向传播的。

1986年在水地地震区开展了人工地震测深工作^[6],作者用上述方法对爆破资料进行了分析处理。

S波到时主要是根据P波到时及理论波速比来确定。另外, S_g 波视周期约为 0.13 — 0.2 秒,比 P_g 波周期大; S_M 波视周期为 0.2 — 0.4 秒,水平向S波振幅一般比垂直向P波大。结合理论的S波到时,利用最大特征值和波形识别算法确定了快、慢S波到时,对超临界角入射的S波,首先对其三分向记录进行振幅和相位矫正,然后再进行分析,同时利用最大特征值对应的特征向量方法确定了快S波偏振方向。表1和表2分别列出了26号炮、123号炮的S波到时及分裂的研究结果。表1和表2中的 S_g 波是沿古老变质岩或结晶基底顶部的首波; S_M 波是来自莫氏面的反射波; S_{M_1} 是下地壳的回折波; S_2 为上地壳底面速度分界面的反射波; S_4 为中地壳界面上的反射波。

现列举其中的部分记录资料用以说明应用本文方法的处理结果。图4a为123号炮49号测点三分向记录,考虑地面的影响效应,认为该测点 S_M 波卓越周期为 0.3 秒,入射角为 60° 左右的超临界角,利用上述的矫正方法得到了矫正后的三分向记录(图4b)和相应的快S波偏振图(图5)。

根据上述分析可以得到如下结论:由 S_g 波资料所得天水地区上地壳裂隙发育方向为 $N87^\circ E$;由 S_M 波资料可得下地壳裂隙发育方向为 $N115^\circ E$;由 S_M 波得整个地壳裂隙发育方向为 $N80.7^\circ E$ 。由于反映中地壳和上地幔区域应力场方向的数据比较少,还不能给出这些区域应力场方向的定量结果,但从仅有的少量资料也可以看出,这些区域的应力场方向为北东到北东东。根据张性扩容各向异性假设,裂隙发育方向平行于最大主压应力方向,因此,上述裂隙发育方向也即应力场的主压应力方向。从上述结果可以看出,天水地区上地壳直至上地幔区域最大主压应力方向很可能有所不同,这是值得深入探讨的。

表 1 26 号炮 S 波分裂结果

| 测点 | 震中距 (km) | 记录径向方位 | 快 S_2 震相到及时及延迟 | 快 S_2 偏振方向 | 快 S_M 震相到及时及延迟 | 快 S_M 偏振方向 | 快 S_2 和 S_4 到及时及延迟 | 快 S_2 和 S_4 偏振方向 |
|----|----------|--------|------------------|--------------|------------------|--------------|---|----------------------|
| 46 | 68.74 | 274 | 1.3 秒 0.35 秒 | N56° E | | | | |
| 47 | 71.77 | 275 | 1.1 秒 0.5 秒 | N71° E | | | | |
| 48 | 74.62 | 276 | 0.8 秒 0.9 秒 | N66° E | | | | |
| 49 | 77.26 | 275 | 1.38 秒 0.9 秒 | N122° E | | | | |
| 55 | 104.69 | 278 | 1.32 秒 1.08 秒 | N116° E | | | | |
| 56 | 107.18 | | | | 10.7 秒 2 秒 | N71° E | S_2 : 3.84 秒 迟 0.53 秒 S_4 : 5.8 秒 迟 0.62 秒 | N97° E N126° E |
| 58 | 111.96 | | | | 8.9 秒 1.3 秒 | N70° E | | |
| 59 | 117.46 | | | | 8.56 秒 0.64 秒 | N83° E | | |
| 67 | 151.29 | | | | 5.7 秒 0.9 秒 | N78° E | | |
| 67 | 154.64 | | | | 5.7 秒 0.9 秒 | N78° E | | |

表 2 123 号炮 S 波分裂结果

| 测点 | 震中距 (km) | 记录径向方位 | 快 S_M 震相到及时及延迟 | 快 S_M 偏振方向 | 快 S_M 震相到及时及延迟 | 快 S_M 震相到及时及延迟 | 快 S_M 偏振方向 |
|----|----------|--------|------------------|--------------|------------------|------------------|--------------|
| 47 | 232.40 | N96° E | | | 2.04 秒 1.56 秒 | | N125° E |
| 48 | 229.44 | N96° E | | | 3.5 秒 1.3 秒 | | N119° E |
| 49 | 226.87 | N96° E | | | 4.24 秒 1.63 秒 | | N90.5° E |
| 55 | 199.34 | N95° E | 2.84 秒 1.12 秒 | N76° E | | | |
| 56 | 196.85 | N95° E | 1.67 秒 1.72 秒 | N93° E | | | |
| 57 | 193.77 | N95° E | 3.3 秒 1.05 秒 | N88° E | | | |
| 59 | 186.58 | N95° E | 4.5 秒 0.55 秒 | N83° E | | | |

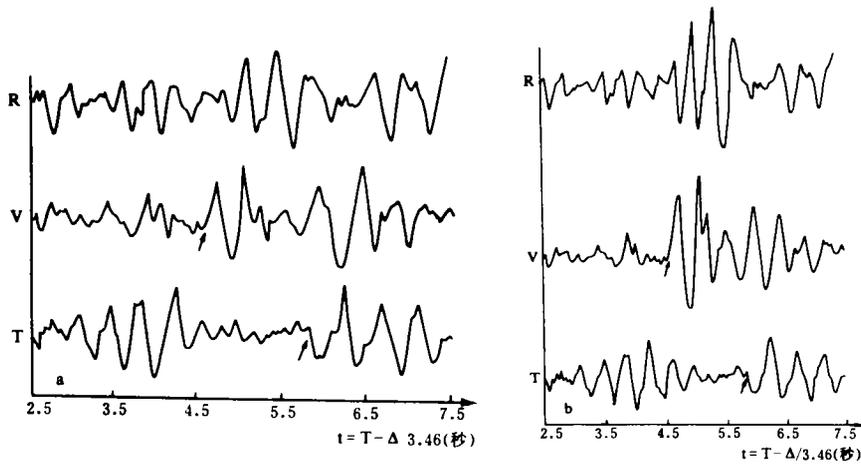


图 4 123 号炮 49 号测点三分向记录

a. 实际记录; b. 经修正后的竖向、径向分量记录

Fig. 4 Three component records (a) and corrected vertical and radial components (b) at No. 49 measuring point about the 123rd shot.

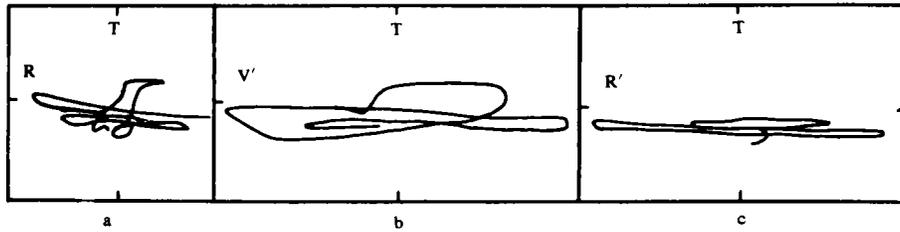


图 5 修正前后快 S 波偏振图

a. 修正前; b. 竖向分量修正后; c. 径向分量修正后

Fig. 5 Fast S-wave polarization diagrams before and after correction.

(本文 1994 年 12 月 23 日收到)

参考文献

- 1 彭成斌,等. S波极化研究的评述. 中国地震, 1987, 3(4): 30—40
- 2 郑治真. S波分裂在地震趋势估计中的应用. 地震研究, 1991, 14(1): 1—7
- 3 Crampin S and Evans J R. Analysis of reads of local earthquakes, the Turkish dilatancy projects. *Geophys J R Astro Soc*, 1985, 183: 1—6
- 4 Evans R. Effects of the free surface on shear wave trains. *Geophys J R Astro Soc*, 1984b, 76: 165—172
- 5 安艺敬一, P G 理查兹. 定量地震学. 李钦祖, 邹其嘉等译. 北京: 地震出版社, 1987, 1: 123—171
- 6 李清河, 等. 天水地震区人工地震测深资料解释与研究文集. 西北地震学报, 1991, 13 (增刊): 1—32
- 7 刘希强. 剪切波分裂中快、慢波识别方法. 西北地震学报, 1992, 14(4): 17—24

TENTATIVE STUDY OF S WAVE FISSION OUTSIDE CRITICAL WINDOW

Liu Xiqiang, Li Qinghe* and Li Hong

(*Seismological Bureau of Shandong Province, Jinan 250021*)

Abstract

Based on the discussion about the effects of free-surface on the incident shear wave, this paper first puts forward a method used to treat the S-wave splitting data outside the critical window. After correcting the amplitude and phase of vertical and radial components, authors analysed the data by using the greatest characteristic values and waveform discrimination operator method, and also analysed explosion data in Tianshui area of Gansu. It may be seen the data show the seismic phase of S wave and S wave fission.

Key words: S wave fission, Free interface, SH wave, SV wave, Anisotropic medium

* Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000