

中文引用格式:曾成,王有学,熊彬,等.天然地震的横波分裂及其应用[J].工程地球物理学报,2018,15(3):261-265.

英文引用格式:Zeng Cheng, Wang Youxue, Xiong Bin, et al. Shear wave splitting of earthquake and its application[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(3): 261-265.

天然地震的横波分裂及其应用

曾 成, 王有学, 熊 彬, 蒋婵君, 王心宇, 张 琪, 胡锦涛

(桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541006)

摘 要: 横波分裂方法是地震学中研究地球内部介质各向异性的重要方法之一。首先在对横波分裂方法进行研究的基础上,利用波形相关法对横波分裂进行了研究。然后通过选择合理的时间窗口可以计算出地下介质的快波偏振方向和快、慢波时间延迟,从而得到断裂带走向和断裂发育程度。最后,利用波形相关法对广西地区 QXY01 台站宽频带地震记录数据进行了分析和研究,该结果与当地的地质构造情况相吻合。

关键词: 各向异性;横波分裂;波形相关法

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1672—7940(2018)03—0261—05

doi: 10.3969/j.issn.1672—7940.2018.03.002

Shear Wave Splitting of Earthquake and its Application

Zeng Cheng, Wang Youxue, Xiong Bin, Jiang Chanjun,

Wang Xinyu, Zhang Qi, Hu Jinfeng

(School of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541006, China)

Abstract: The shear wave splitting is one of the most important study tools to study the anisotropy of the earth's internal media in seismology. Based upon the study of the shear wave splitting techniques, this paper uses wave correlation method to deal with the shear wave splitting. By setting a proper time window, it can calculate the polarization direction of fast wave and the time delay of fast and slow wave for underground medium to get the trend of fault zone and fracture degree. Finally, the method is applied to the earthquake data acquired at station QXY01 in Guangxi portable earthquake networks, which is consistent with the local geological structure.

Key words: anisotropy; shear wave splitting; wave correlation

收稿日期: 2018—01—13

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41574039); 广西自然科学基金重点基金项目(编号: 016GXNSFDA380014)

第一作者: 曾 成(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事应用地球物理研究。E-mail: 1911108305@qq.com

通信作者: 王有学(1961—), 男, 博士研究生, 教授, 主要研究方向为地球物理、地球内部结构及动力学。E-mail: uxue.Wang@glut.edu.cn

1 引言

对于深部地球物理探测而言,地震波被认为是人类认识深部地球内部结构最有效的工具。地震波从震源出发,穿过各种地下介质到达测量台站,此时的地震波将携带丰富的与地下构造相关的信息,各向异性就是其中非常重要的研究内容之一。其中天然地震 S 波分裂是研究地球内部各向异性的重要途径之一。在研究地球介质的各向异性时,通常认为快波偏振方向与裂隙、构造走向或物质的定向排列方向平行,慢波偏振方向垂直于裂隙、构造走向或物质的定向排列方向,它反应了地球内部的物质特性、构造变形和动力学特征,已逐渐成为研究地球内部物质各向异性最热门的手段之一。

Crampin 等于 1979 年,开创了 S 波分裂研究的先河^[1],并首次发现了地震横波在穿过各向异性介质后会产生横波分裂现象^[2]。横波穿过各向异性介质时将会分裂成两个传播速度不同且偏振方向垂直的波,因此,两列波之间存在着一个相对旅行时差。通过测量和计算横波分裂后的快波偏振方向和快、慢波的旅行时间之差,可以得到物质受力变形的方向和形变强度。1981 年 Crampin 等利用横波分裂方法发现北安纳托利亚断层正在膨胀^[3],1990 年 S Kaneshima 等在日本进行横波分裂的研究来寻找各向异性的成因^[4]。

而在国内,1996 年丁志峰等于青藏高原进行了横波分裂的观测研究^[5],2002 年赖院根等于新疆伽师地区对强震群区的横波分裂与应力场特征进行了探讨^[6],2010 年常利军等利用横波分裂方法对玉树地震进行研究^[7],2011 年胡亚轩等利用横波分裂技术等对鄂尔多斯块体及周缘上地幔各向异性进行研究^[8]。2013 年,孙长青等利用横波分裂方法对云南地区地壳各向异性及其动力学意义进行研究^[9]。2017 年,吴晓光等利用横波分裂方法对含煤页岩气储层压裂锋高度进行研究^[10]。

横波分裂不仅在固体地球物理方面有着重要的作用,而且在工程地球物理方面也有着广泛的应用。本文将采用波形相关法对广西地区宽频带流动地震台网的地震记录进行分析和应用。

2 横波分裂分析的基本原理

当地震波在入射各向异性介质时,横波将会产生横波分裂现象(图 1),入射横波将分裂成两个传播速度不同且偏振方向垂直的波,即快、慢波。其中快波的振动方向平行于裂隙或构造走向,传播速度更快,能量损失更小;慢波的振动方向垂直于裂隙或构造走向,传播速度慢,能量损失相对较大。快、慢波之间存在旅行时差(时间延迟) δ_t 和偏振方向 φ ,时间延迟 δ_t 反映了介质各向异性的强弱,偏振方向 φ 反映了介质中裂隙、构造走向或矿物的定向排列方向。

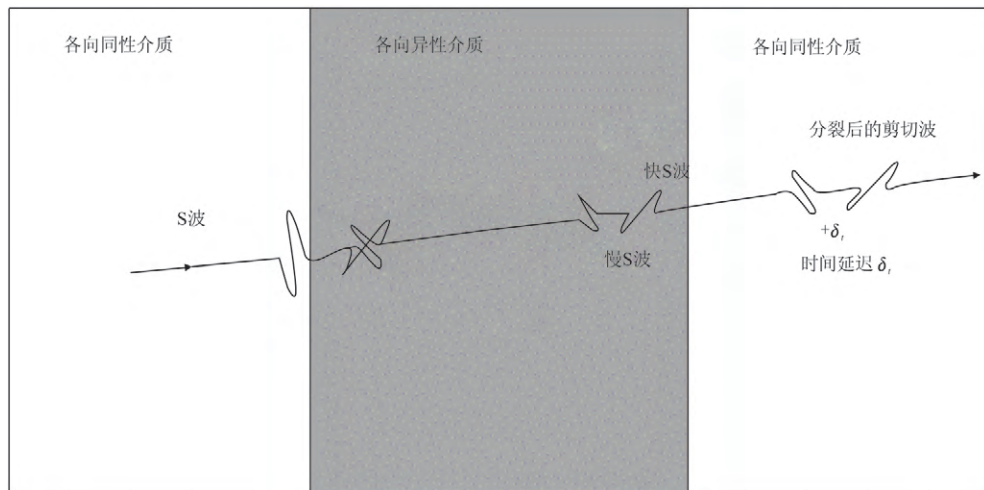


图 1 横波在各向异性介质中的分裂现象

Fig. 1 Diagram of shear wave splitting in anisotropic medium

宽频带三分量地震记录仪采集的地震数据包含两个水平分量(南北分量 $N(t)$ 和东西分量 $E(t)$) 及一个垂向分量 Z , 将东西向和南北向的波形旋转到径向 $R(t)$ 和切向 $T(t)$ 上, 计算公式如下

$$\begin{cases} R(t) = N(t)\cos\beta + E(t)\sin\beta \\ T(t) = -N(t)\sin\beta + E(t)\cos\beta \end{cases} \quad (1)$$

其中, β 是反方位角, 即台站到震中的连线与地理北向的夹角。

横波分裂分析方法有很多, 诸如切向能量最小化方法、特征值法和波形相关法等方法, 本文将主要以波形相关法为例进行研究。

1987年, 由 Bowman 等最先提出了波形相关法^[11], 用于研究上地幔各向异性引起的横波分裂现象。该方法认为当地震波穿出核幔边界后产生的转换横波, 在经过上地幔各向异性介质后会分裂产生快、慢波。由于快、慢波来自同一个波源, 在经过时间校正后, 这两个波列应该是相关的。因此, 波形相关法就是通过相关分析来判断通过重新投影而分解的两个波列是否为横波分裂产生的快、慢波。

首先利用适当的时间窗(最理想的时间窗是

在理论到时附近范围内包括快波和慢波的波至的部分)截取相等长度的径向 R 和切向 T 分量地震波数据; 然后对新得到的两个波列以一定的时间步长 τ 来构成互相关函数

$$\gamma_{ij}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n R_i(t) T_j(t+\tau) \quad (2)$$

其中, n 为数据个数。通过计算相关系数 $r_{ij}(\tau)$, 可以定量地衡量两个波形之间的相似程度, 当 $r_{ij}(\tau)$ 达到最大时, 所对应的 τ 即为快、慢波之间的时间延迟 δ_i 。

根据径向 R 和切向 T 分量地震波数据的振幅形成的质点振动图的长轴方向确定出快慢波之间的偏振角度 α , 然后, 根据反方位角 β , 即可得到偏振方向 $\varphi = 90^\circ - \alpha + \beta$ 。

3 横波分裂的应用

图2是广西地区宽频带流动地震台网 QXY01 台站观测到的两次地震(表1)的地震记录(已旋转), 并且根据 IASP91 地球模型计算出 S 波的理论到时^[14](图2, 图3)。

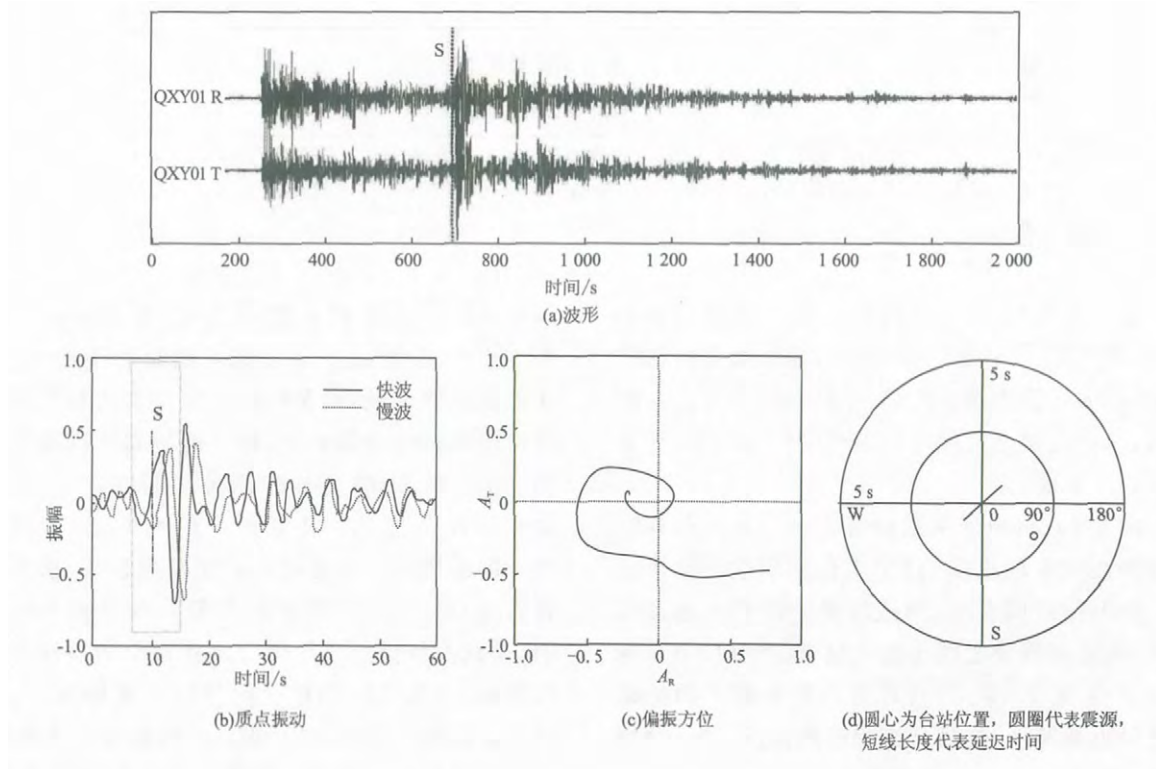


图2 巴布亚新几内亚地震在台站 QXY01 的记录和横波分裂处理结果

Fig. 2 Seismic records from Papua New Guinea event at the station QXY01 and the results of shear wave splitting

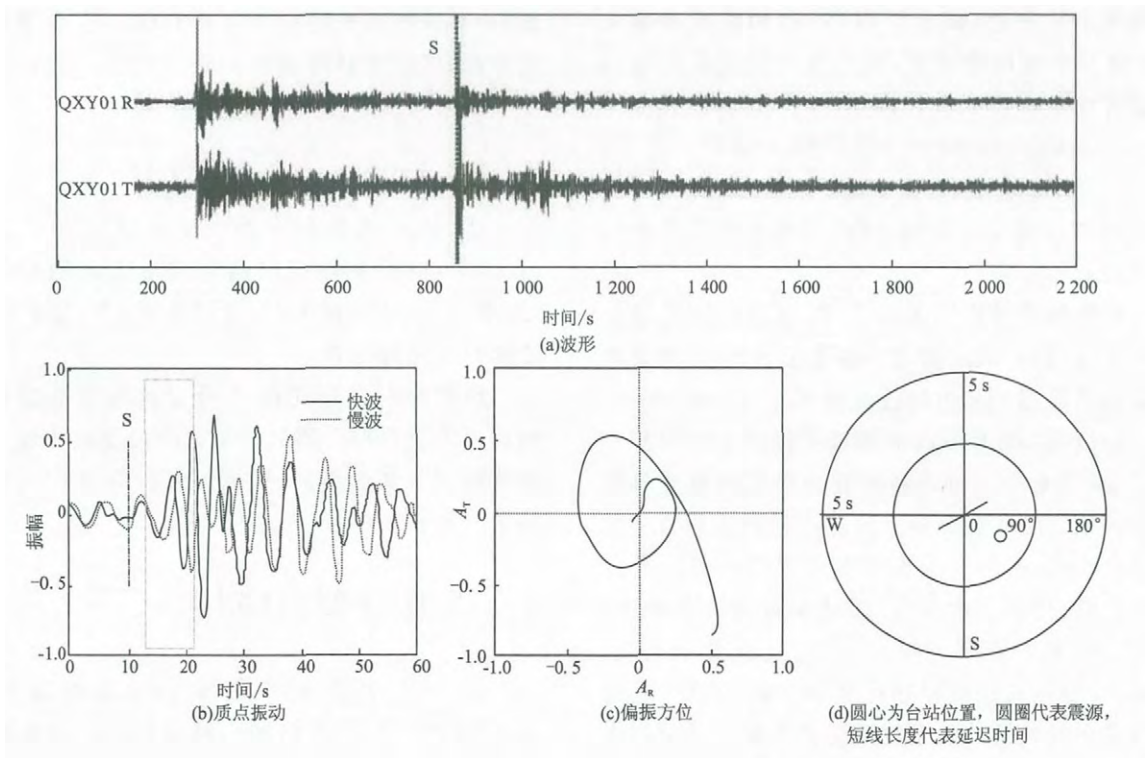


图 3 新喀里多尼亚地震在站 QXY01 的记录及横波分裂

Fig. 3 Seismic records from New Caledonia event at the station QXY01 and the results of shear wave splitting

表 1 地震事件信息

Table 1 Information table of seismic event

事件编号	时间(UTC)	经度/°E	纬度/°N	震源深度/km	震级	震中距/°
巴布亚新几内亚地震	2014/04/19 13:27:33	154.93	-6.72	30.87	7.5	53.18
新喀里多尼亚地震	2014/05/01 06:36:35	170.35	-21.45	106.00	6.6	73.93

对于上述数据,本文截取了 60 s 的地震数据(理论到事前 10 s 至其后 50 s),利用数据的采样间隔(10 ms)作为扫描间隔,手动选取合适的时间窗口,计算快慢波时间延迟及快波偏振方向,其结果见图 2 和图 3。

图 2(a)、3(a)分别是新喀里多尼亚地震和巴布亚新几内亚地震在 QXY01 台站的地震波形记录。由上图可以看出,当横波第一次到达地震台站时,快波和慢波之间出现了显著的到时差(分别是 1.10 s 和 1.19 s),可以看出质点粒子的运动轨迹呈近椭圆形,并且具有相近的偏振方向(分别为 47.7°和 62.38°,平均值为 55.04°)。

QXY01 台站位于(25.024°N, 111.027°E),位于湖南省永州市江永县粗石江镇,其下的快波偏振方向为 NE 向;而根据研究资料表明^[15-17],

该台站位于观音阁断裂带上,该断裂带走向为 NE 向,快波偏振方向与观音阁断裂走向一致。在新元古代早期,受秦岭地区早古生代板块和碰撞朝南推挤应力的影响,扬子地块和华南地块间的江绍海盆关闭,并向华南地块俯冲,于加里东期成 NW 向碰撞。在新元古代晚期,先前拼合在一起的扬子—华夏联合陆块发生裂解,裂解位置为绍兴—江山—萍乡断裂带。在早古生代晚期,受到古特提斯洋的闭合及其对应的碰撞作用的影响,华夏块体和扬子块体再次碰撞聚合,形成了真正统一的南方大陆。该台站在大地构造位置上处于扬子地块和华南地块拼合带西部,也是江南造山带和华南褶皱带相交部位的南缘^[18]。受扬子地块和华南地块碰撞—裂解—碰撞的复杂构造演化作用,使得台站下方的地幔物

质在区域构造应力场的作用下,沿 NE 向发生形变以致流动,它使地球内部介质的晶体呈 NE 方向定向排列。

4 结 论

通过对横波分裂方法的分析和研究,利用波形相关法对广西地区宽频带地震流动台网观测数据的应用可以得到如下结论:

1) 波形相关法可通过时间窗口的合理设置来保证结果质量;

2) 对于同一台站接收到的不同地震事件,其横波分裂导致的快波偏振方向和延迟时间都具有很好的一致性,进一步表明了波形相关法的有效性;

3) 利用波形相关法对广西地区 QXY01 台站宽频带地震记录数据进行了相关分析和研究,结果表明台站下方的平均快波偏振方向为 55.04° ,与所处观音阁断裂带走向 NE 的事实相符。

参考文献:

- [1] Crampin S. Seismic anisotropy in the upper mantle [J]. *Tectonophysics*, 1979, 56(1): 131-131.
- [2] Crampin S, Evans R, Üçer B, et al. Observations of dilatancy—induced polarization anomalies and earthquake prediction[J]. *Nature*, 1980, 286(5776): 874-877.
- [3] S Crampin, J R Evans, M Doyle. Evidence for dilatancy on a section of the north Anatolian fault from observations of shear-wave splitting[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, 65(1): 248.
- [4] Kaneshima S. Origin of crustal anisotropy: Shear Wave splitting studies in Japan[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1990, 95(B7): 11 121-11 133.
- [5] 丁志峰, 曾融生. 青藏高原横波分裂的观测研究[J]. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 211-220.
- [6] 赖院根, 刘启元, 陈九辉, 等. 新疆伽师强震群区的横波分裂与应力场特征[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(1): 83-92.
- [7] 常利军, 丁志峰, 王椿镛. 2010 年玉树 7.1 级地震震源区横波分裂的变化特征[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(11): 2 613-2 619.
- [8] 胡亚轩, 崔笃信, 季灵运, 等. 鄂尔多斯块体及其周缘上地幔各向异性分析研究[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(6): 1 549-1 558.
- [9] 孙长青, 雷建设, 李聪, 等. 云南地区地壳各向异性及其动力学意义[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(12): 4 095-4 105.
- [10] 吴晓光, 李阳兵, 章文达, 等. 利用横波各向异性评价含煤页岩气储层压裂缝高度——以新场地区须家河组五段为例[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(4): 468-474.
- [11] Bowman J, Ando M. Shear-wave splitting in the upper-mantle wedge above the Tonga subduction zone [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1987, 88(1): 25-41.
- [12] 孙长青, 雷建设, 朱德富. 利用横波分裂分析方法研究地壳各向异性综述[J]. *CT 理论与应用研究*, 2014, 23(4): 687-697.
- [13] 卞龙. 横波分裂及应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [14] 何晓玲, 王有学, 张琪, 等. 近震定位技术及其在桂东北宽频带地震流动台网中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(3): 345-349.
- [15] 柏道远, 黄建中, 李金冬, 等. 华南中生代构造演化过程的多地质要素约束-湘东南及湘粤赣边区中生代地质研究的启示[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 3(1): 755-771.
- [16] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 418-431.
- [17] 马瑞士. 华南构造演化新思考兼论“华夏古陆”说中的几个问题[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(4): 448-456.
- [18] 魏春夏. 桂东北加里东期花岗岩岩石成因及其地质背景[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.