

郑建常 2014, 断层带震相及其应用研究现状与展望, 中国地震, 30(1), 1~12。

## · 研究综述 ·

# 断层带震相及其应用研究现状与展望

郑建常<sup>1 2)</sup>

1) Department of Earth Science, University of Southern California, Los Angeles CA, 90089

2) 山东省地震局, 济南市历下区文化东路 20 号 250014

**摘要** 利用断层带特有震相通过观测模拟可以得到断层带介质的性质。本文回顾了地震学领域中断层带震相研究的发展历程, 对断层带首波、断层带围陷波的国内外研究现状进行了综述, 并结合国际上有关断层带震相研究的最新进展, 对基于地震波形研究断层性质的前景进行了展望。

**关键词:** 断层首波 围陷波 断层低速结构 断层介质性质 断裂带各向异性

[文章编号] 1001-4683(2014)01-001-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地壳深部断层结构及其介质性质的研究一直是地震学领域的重要课题。传统的地震层析成像和人工地震剖面探测都难以得到地壳深部断层的精细结构。20 世纪 90 年代以来, 与断层带结构中破碎岩石构成的低速层直接相关的断层震相开始引起地震学家的注意 (Li et al, 1990a、1990b; Ben-Zion et al, 1990b)。

地壳中的断层会对地震波的传播产生影响, 地震学家很早就对此进行过细致的研究 (滕吉文, 1963)。传统上是将断层理想化为断层面进行分析, 随着研究的深入, 人们逐渐认识到断层是由一定厚度的变形岩体构成的, 且具有复杂的内部结构和三维形态 (Ben-Zion et al, 2003b)。

地壳内部的断层, 由于地质时期的长期相对运动, 两侧的岩石变得非常破碎, 从而使得其传播地震波的能力显著降低, 形成低速层, 称为断层带 (Fault-Zone)。较大地震发生时, 直观表现为地表破裂带, 大量的地质调查表明, 破裂带的宽度在数十米到几百米不等 (Ben-Zion et al, 2003b)。地震学家此前已经注意到, 相比两侧的围岩, 断层破碎带表现出低波速 (Mooney et al, 1986)、低  $Q$  值 (Kurita, 1975) 等特征。由于类似低速层的存在, 使得地震波在通过这些低速结构时, 出现与之有关的特殊震相, 包括首波、反射波以及围陷波等, 被称为

[收稿日期] 2013-05-08; [修定日期] 2013-06-29

[项目类别] 国家留学基金委和中国地震局“地震科技骨干人才培养计划”和国家科技支撑计划子专题 (2012BAK19B04-01-05)、山东省自然科学基金 (ZR2012DQ006) 共同资助

[作者简介] 郑建常, 男, 1978 年生, 副研究员, 主要从事地震分析预测工作。Email: zjcm@yeah.net

地震断层带波。其中最为主要的是两种波:断层带首波(FZHW, Fault Zone Head Wave)和断层带围陷波(FZTW, Fault Zone Trapped Wave)。

由于地震断层带波的出现和传播与断层破碎带密切相关,因而其振幅、频率、衰减、频散等特性以及它们的传播时间等都与断层的几何参数及其内部介质的物理性质有关,所以深入地研究断层带波可以了解断层深部的细节,进一步确定断层的形态、特性,对地震预测、震害防御、断层动力学以及工程地震研究等具有重要的意义。

虽然在地震学中对介质低速层中的类似震相认识较早(傅承义, 1965),在地震勘探领域也早已得到应用(如煤矿勘探中的槽波、石油勘探中的导波等),但对断层波的研究起步则相对较晚。Fukao 等(1983)和 Hori 等(1985)分别在日本地区下方的菲律宾海板块消减带观测到了破裂带的首波和围陷波,并进行了射线追踪计算。Cormier 等(1984)计算并讨论了美国加州圣安德烈斯和 Calaveras 断层的地面运动放大和波形复杂性,认为靠近断层的振幅明显增大,与在断层内传播的波有关。Ben-Zion(1989; Ben-Zion et al, 1990a、1990b)分别给出了含有垂直分界面的二维和三维横向不均匀结构中震源产生的波的解析解, Ben-Zion 等(1990b)还给出了含有任意数量垂直层结构的无限半空间内弹性波的二维解,这些结果对断层带波给出了理论解释,奠定了断层带波应用研究的基础。Ben-Zion(1998)给出了这些波在理想的二维各向同性波导中的详细描述和理论属性。自此以后,断层带震相的研究得到了极大的发展。

## 1 断层带首波的研究

与水平层介质中的首波类似,体波在破碎的断裂带层内传播时,由于介质界面的存在,会出现沿着界面传播速度更快的在一侧行进的波。在靠近断层位于速度较慢介质的台站,这些震相比直达体波更先到达,称为断层带首波。断层带首波的初动符号与直达波相反(图1)。

正确地识别和分析断层带首波,可以显著地提高小震定位精度,可以修正因初动符号读取错误造成的小震震源机制误差,改善精细速度结构的分辨能力。Ben-Zion 等(1991)在圣安德烈斯断层的 Parkfield 地区首先观测到了断层带首波,分析结果表明首波对孕震深度的断层结构有较高的敏感性,使用台阵数据分析首波和直达 P 波之间不同的到时,可以提供有关断层两侧介质性质差异的信息。Ben-Zion 等(1992)使用断层带首波和直达 P 波的到时进行联合走时反演,得到了该地区断层附近地壳的层析成像结果,并且发现断层两侧的速度比在 3km 以内的浅层约为 10%~20%,在地壳更深处下降为 3%~7%。McGuire 等(2005)利用台阵数据检查了圣安德烈斯断层熊谷(Bear Valley)段的小震记录,重新识别了首波和直达 P 波到时,并通过小震重新精定位,对该断层段孕震深度的结构进行研究。Lewis 等(2007)、Zhao 等(2008、2010)等在其他地区对不同的断层进行研究,取得了显著的成果。

由于断层带首波的整个传播路径基本都在断层界面内,断层界面上同时还会出现反射波、折射波,所以联合使用这些震相有可能得到更详细的断层结构信息。Igel 等(1997)、Ben-Zion(1998)、Mamada 等(2002)等通过数值试验检查了不同介质参数对断层带首波传播的影响情况。Hough 等(1994)通过同时模拟 1992 年加州约书亚树(Joshua Tree) M6.1 地震余震区的首波波形以及断层面反射波波形,得到了该断层的破碎带厚度、断层破碎带与围

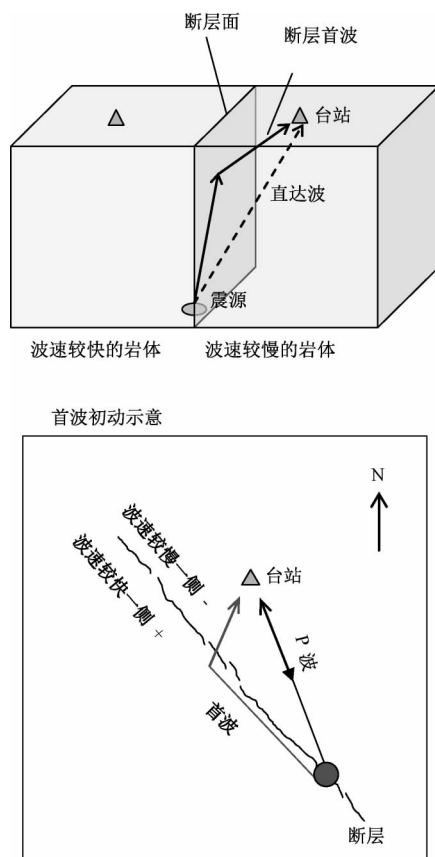


图 1 断层带首波路径示意图

岩的速度差异以及 P 波的介质品质因子等参数。Bennington 等(2013) 综合使用断层首波以及直达波第二到时 (direct wave secondary arrivals) 等对断层破裂带进行断层结构的精细成像。

有关断层带首波的研究在日本 (Mamada et al, 2002、2004)、土耳其 (Bulut et al, 2012)、中东死海地区 (Haberland et al, 2003) 等也都得到了很好的应用。

## 2 断层围陷波的研究

地震波在低速结构内传播时,在介质界面上发生反射和透射,由于界面两侧的速度差异,当射线的入射角超过临界角时,波在界面上出现全反射,此时低速体形成波导,大部分地震波能量集中在波导内传播(图 2),称为导波(guided wave),对断层破碎带内生成的导波,则称为断层带围陷波(Li et al, 1990a; 樊计昌等, 2007)。断裂带围陷波是在低速断层结构内传播的、与临界反射有关的结构干涉震相,类似于水平层介质中的 Love 面波(Ben-Zion, 1998; Malin et al, 1996); 因此传播速度较慢,通常在首波、直达波和早期散射波之后到达,其特征是大幅振荡,在波导内随着传播距离的增加而出现频散,并且与体波相比具有明显低频成分(Ben-Zion, 1998、2003a、2003b; Peng et al, 2003)。

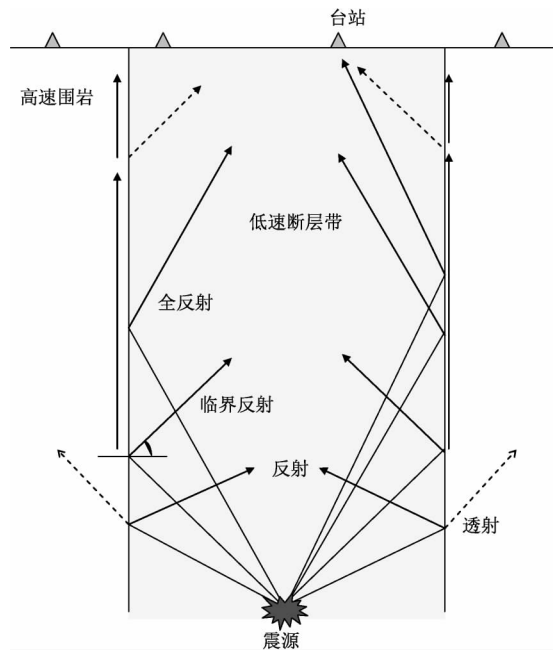


图2 断层带围陷波形成过程示意图

对围陷波的研究缘自煤炭工业的发展,在煤矿地震勘探中,通常称围陷波为槽波。20世纪中叶,人们注意到煤层槽波并开始进行研究,70年代末,提取与利用槽波震相的槽波勘探技术取得了突破性进展。煤层和相邻的岩面有强烈的速度对比,近似于理想的围陷波激发和观测条件。由于煤层厚度相对均匀,采矿中通过在煤层面上模拟震源和接收点,这种情况下,很小的爆破就可以激发高度频散的 Love 和 Rayleigh 波列。利用在井下煤层中激发和传播的导波(煤层槽波),可以探测到煤层的不连续性,了解煤层厚度变化趋势,这一技术在煤矿的地震勘探中已经相对成熟(于景邨等 2007;程建远等 2009)。

对这一震相的应用研究在近 30 年来才逐渐开始,如 Hori 等(1985)、Shapiro 等(1998、2000)对板块消减带的导波的研究,以及 Julian 等(2010)对地幔柱导波存在可能性的分析等。

相对于地震勘探的发展,断层带围陷波现象的研究则比较困难,很大程度上可能是地表观测的问题。在地壳深部,断层破碎带可能是狭窄的平面结构,易于产生和传播围陷波。但在近地表,断层带显示出复杂的分支结构(如正断层带发育的一系列同向断层、反向断层,逆断层冲断层发育的伴生构造以及走滑断层带的花状构造等);并且接近地球表面的垂向和横向不均匀性对断层深部传来的围陷波有很强的散射作用;最后,由于围陷波传播速度较慢,到达地表时很容易和尾波混杂在一起,难以识别。

Li 等(1990a、1990b)较早地给出断层带围陷波的观测实例。他们在北加州 Oroville 活动正断层附近的结晶基岩场地,用 5 个钻孔地震计记录到了地表震源激发的围陷波;在加州的 Parkfield 场地,同样记录到了圣安德烈斯断层带的至少两个例子。随着理论方法的进步和计算技术的发展,断层围陷波的观测和研究已经得到普遍应用(Nishigami et al, 2001;

Rovelli et al, 2002; Korneev et al, 2003; Ben-Zion et al, 2003a; Haberland et al, 2003; Mizuno et al, 2004、2006; Wang et al, 2009)。

断裂带围陷波在郇永刚等人的工作之后受到了很大的关注(Li et al, 1990a、1990b、1994、1998)。研究发现,1992年加州兰德斯(Landers)7.4级地震断裂带的导波速度逐年加快,分析认为这可能表明岩层重新变硬,含水量增加,断层正在逐步恢复到地震发生前的状态(Li et al, 1998)。过去,科学界一直猜测,地震断层存在“地震-愈合-再地震”的循环,但从未得到证实。郇永刚等的研究成果,第一次提供了断层“愈合”的观测证据,从而受到高度重视。

Li等(Li, 2003; Li et al, 2003)的进一步研究结果显示:断层愈合速率并非常量,在震后初期愈合得较快,同时各段断层愈合快慢不一;主震中位移较大、岩石破碎较严重的断层主震后愈合率较高,邻近地区的强烈地震,可能中断、延缓该断层带的愈合过程。

对断层带围陷波的性质,地震学家进行了大量的数值模拟研究(Huang et al, 1995; Li et al, 1996; Igel et al, 1997、2002; Jahnke et al, 2002; Fohrmann et al, 2004; Wu et al, 2008)。Igel等(1997、2002)、Jahnke等(2002)模拟讨论了不规则2D和3D断层带结构中导波的属性。Huang等(1995)的数值模拟研究发现:断层带对波场的影响可以在断层带外数个波长的地方观测到。最初认为只有位于断层带内或下方的震源才能产生围陷波,而Igel等(2002)和Fohrmann等(2004)的研究结果显示即使震源位于较深的位置或者在断层以外,浅层破裂带仍可以产生围陷波;相反,各向同性或变化平滑的破裂带,如果其超过地震深度范围,则要求震源在破裂带内或者非常接近破裂带时才会产生围陷波。这已经为大量的观测事实所证实(Ben-Zion et al, 2003a、2003b; Peng et al, 2003)。

大多数围陷波的研究表明,断层低速层的宽度在数十米到一、二百米,波速相对围岩的下降在20%~50%, $Q$ 值约为10~50(Li et al, 1997、1998、2004; Rovelli et al, 2002; Ben-Zion et al, 2003a; Haberland et al, 2003; Lewis et al, 2005; Lewis et al, 2010)。但是,对产生围陷波的断层低速结构的深度范围还存在争议,一些研究认为断层波导可能延伸到超过10km深度的孕震区(Li et al, 1997、1998、2004; Li et al, 2001; Nishigami et al, 2001; Mizuno et al, 2004; Mizuno et al, 2006);而另外一些研究则认为低速结构被局限在地壳的浅层(如2~5km, Ben-Zion et al, 2003; Peng et al, 2003; Lewis et al, 2005)。

例如Li等(2001)的研究显示, San Jacinto断层存在15~20km深的低速带,但Lewis等(2005)使用同样的数据,不同计算方法以及Yang等(2010)使用反射波、绕射波等不同震相的研究结果显示,该断层的低速带可能限制在3~5km深。再如圣安德烈斯断层的Parkfield段, Li等(2004)使用密集台阵记录的爆破和微震资料,通过三维有限差分方法模拟围陷波,认为该断层低速带下限深度可能到5km;而Lewis等(2010)详细检查了靠近断层的数千次地震记录,通过对识别出的清晰围陷波进行拟合后认为,断层低速带深约3km,并认为低速带沿走向存在明显变化,不存在超过3~5km长的连续波导。Peng等(2003)有关1992年Landers地震破裂带的小震观测显示,大量的断层以外的地震也可以产生显著的围陷波,并且S波和围陷波的到时差没有随着震源到接收点的距离增加而增长,因此也认为发现的围陷波很可能与较浅的断层带层有关。Wu等(2008)使用随深度变化的断层模型研究显示,断层低速带随深度变化的围陷效率具有频率依赖性,在频率较低时,近地表断层结构比较深

的断层带能够更有效地产生导波;深度越深,低频成分的围陷效率越低,因而只能作为体波传播;因此研究孕震区深处的断层结构则要对更高频率的围陷波进行分析。

上述争议,很可能是由于围陷波的产生和传播条件比较复杂、能够影响围陷波的因素较多造成的。Huang 等(1995)应用伪谱法给出了混合边界条件的 3D 介质内围陷波传播的数值结果,数值试验显示,当通过不同宽度的断层段时,波场相应地改变形状,并出现新的散射波,因此由于断层带宽度的改变会使得围陷波的分析非常复杂;Li 等(1996)使用有限差分模拟说明了震源离开断层的距离以及断层带和围岩的速度对比对围陷波的影响,并且发现厚度超过断层带宽度 1~2 倍的沉积层将会严重破坏断层带作为波导的能力;Igel 等(1997)发现,断层带内介质属性的不均匀性也会破坏断层作为围陷波传播通道的能力,但另一方面,断层带内介质的小尺度的随机不均匀性和适度的几何干扰对断层带围陷波的波形影响不大,断层带围陷波出现在给定台站意味着断层带结构在记录波长范围内是相对统一的。

为了弄清楚断层带波对介质速度、衰减系数、断层带的宽度以及震源-接收点的分布形态的依赖情况,Ben-Zion(1998)做了系统的数值检验。结果表明:震源在低速区域内的相对横向位置的变化改变了与内部反射有关的长度尺度,并且影响最终的干涉图案;较低的介质  $Q$  值明显影响波的优势周期和整体持续时间;接收点的横向和深度位置决定了干涉图案的复杂程度,观测到的运动轨迹与接收点的位置密切相关。因此,是多种因素(沿断层的传播距离、断层带宽度、断层介质与围岩的波速对比、断层带内的震源位置以及介质  $Q$  值等)的共同作用,影响断层带围陷波。对断层带外的震源,围陷波的生成和传播情况则更为复杂。

断层带波影响因素的复杂关系决定了反演问题的多解性。使用合成波形与观测波形的拟合来推断断层带低速结构的性质时,如果不充分考虑不同参数的变化,则得到的结果很可能有较大的不确定性。Li 等(2007)发展了通用射线方法,基于高频体波记录到的断层低速带的反射波、折射波到时,可以有效地减少断层带宽度和波速之间的参数折中(tradeoff)情况。如何在围陷波的分析中更加可靠地反演和推断断层介质的参数,仍然是未来值得深入研究的问题。

### 3 国内对断层波的研究

国内近年来才开始对断层带围陷波的研究。2001 年昆仑山口 8.1 级地震发生后,丁志峰等(2002)在昆仑山口东、西两侧约 20km 的范围内沿平行断层和垂直断层方向布设了两条测线,共 31 套地震仪,最早开展断层围陷波的研究。他们分析人工地震的记录发现,两条测线均发现了明显的断层围陷波。并且研究显示,在数千米的深度断层破碎带宽度超过 300m,远大于地表破裂带的宽度(丁志峰等,2002;Wang et al,2009)。

围绕昆仑山口 8.1 级地震产生的断裂带,国内基于断层围陷波在不同方面开展了相对深入的研究(李松林等,2002、2005;楼海等,2006;姚志祥等,2007、2010)。李松林等(2005)在该断裂带另外布设了一条测线,对观测数据的进一步分析处理表明:①无论是人工地震震源还是天然地震震源,只要位于断层带内或紧靠断层带,均能激发断层围陷波;②断层围陷波的能量主要集中于断层带内,其振幅随测点与断层带距离的增加而急剧衰减;③断层围陷波的优势频率与断层的宽度及断层带内介质的速度有关,断层带越宽,或断层带内部介质速度越低,则观测到的断层围陷波的优势频率越低;④断层围陷波存在频散现象。楼海等

(2006) 使用爆破资料计算速度频散和群速度, 并估算了断层低速结构及其围岩的  $Q$  值, 给出了断裂带的浅层速度模型。姚志祥等(2007) 利用交错网格有限差分方法对昆仑山断裂带人工爆破产生的围陷波进行了三维数值模拟, 并进一步利用该方法进行网格搜索, 通过合成波形与观测波形的拟合, 确定了昆仑山断裂带的宽度和  $Q$  值等参数(姚志祥等 2010)。

断层围陷波的相关研究在其他断裂带上也逐渐得到应用, 如海原断裂带(刘明军等, 2004)、龙门山断裂带(赖晓玲等 2008、2009)、库赛湖-玛沁断裂带(潘纪顺等 2009)。研究使用的数据不仅限于人工地震资料, 也包含天然地震(余震)资料。

围陷波的分析需要对地震记录进行滤波, 提取振幅谱, 然后进一步确定断裂带内部结构和介质属性。樊计昌等(2007) 采用小波包技术, 给出了联合利用围陷波和体波计算断层带内介质群速度、 $S$  波速度和  $S$  波  $Q$  值的方法。

李松林等(2007) 首次将断层围陷波方法应用到城市活断层探测, 取得了较好的结果。他们认为, 在城市活断层探测中, 断层围陷波的方法具有非常独特的优越性。

## 4 未来发展方向的展望

近年来, 地震学家普遍注意到了地震断层带震相在断层研究中的应用。滕吉文院士在归纳 21 世纪地球物理学研究面临的机遇、发展和挑战时, 将断层导波与断层愈合以及断层深部介质和构造环境的研究列为最主要的 12 个前沿课题之一(滕吉文 2007)。综合最新的研究成果看, 除了对断层带首波和围陷波的性质及其反映的断层结构的深入分析以外, 有关对断层带震相的研究还有以下几个发展趋势:

### (1) 更加详细的震相识别与分析。

由于断层结构的复杂性, 波在断层带内的传播过程也十分复杂。围陷波类似于水平层介质中的地表 Love 波, Malin 等(1996) 发现波在断层带内传播时还可能出现运动和衰减特性类似于地表 Rayleigh 波的波列, 并命名为“ $F_R$ ”震相。该震相对介质的  $P$  波和  $S$  波速度敏感, 它的出现意味着  $P$  波和  $S$  波的不同程度的下降, 并伴有介质体积模量的较大变化, 初步分析认为这可能与流体在地震破裂中的作用有关(Malin et al, 1996)。

### (2) 综合多个震相的高精度震源定位和断层结构分析。

断层低速带作为地壳内的低速体, 地震波在地壳传播过程中会在其边界发生反射、折射、衍射等现象。除了前面所说使用断层首波、围陷波的例子(Bennington et al, 2013, Hough et al, 1994) 外, Li 等(2007) 分析了断层反射波, 认为该震相更加稳定, 更易区分, 其到时和振幅信息对断层带的结构提供了更进一步的约束; Yang 等(2010、2011) 以及 Bennington 等(2013) 综合使用直达波和断层低速带的反射波或绕射波, 利用相对振幅和走时差来推断断层低速带的倾角和下限深度, 进一步约束断层和围岩的速度差异。另外, Cochran 等(2009) 使用到时、围陷波和 InSAR 资料进行联合分析, Ozakin 等(2012) 使用远震到时, 也分别取得了断层带的有关属性。

### (3) 断层带的各向异性分析

已知地壳介质内有序排列的裂隙会产生可观测的各向异性传播特征, 如走时延迟和  $S$  波分裂。高度破碎的断层带岩石在传播地震波时, 各向异性的效应可能更加明显。Leary 等(1987) 较早地检查了断层带的各向异性, 此后在全球不同地区的断裂带相继开展了类似研

究,如美国加州圣安德烈斯断层(Aster, 1990; Zhang et al, 1994; Karageorgi et al, 1997; Cochran et al, 2003、2006)、台湾集集地震破裂带(Liu et al, 2004、2006)以及土耳其安纳托利亚断裂带(Peng et al, 2004、2006)等。

断层内裂隙更加有序的排列可能影响P波和S波的传播,在平行断层和垂直断层方向分裂出快慢波。近年来,地震学家注意到对断层各向异性 and 断层带特有震相进行综合分析,有可能得到有关断层性质的更深入细致的结果(Cochran et al, 2003、2006; Liu et al, 2004、2006; Peng et al, 2004、2006)。Nakamura等(2006)通过数值试验研究了断层带地震波场的各向异性效应,结果显示慢剪切波及其反射波的震相和时间延迟与断层带的各向异性度成正比;并且不同类型的震源受断层速度结构和各向异性度影响的相对程度不尽相同。

#### (4) 在其他低速结构中的应用

断层带震相同样可以作为研究其他低速结构内介质性质的重要工具,例如在火山或地热场地,由于介质性质的差异更加明显,类似断层带震相的应用将更加便利和有效(Ben-Zion, 1998), Lou等(1997)通过模拟微震的断层带导波估计了地热场地速度结构。另外的应用如前面所提到的对板块消减带(Hori et al, 1985; Shapiro et al, 1998、2000)和地幔柱(Julian et al, 2010)的研究等都有望取得突破性的进展。

致谢:国家留学基金委和中国地震局“地震科技骨干人才培养计划”提供资助,美国南加利福尼亚大学地球科学系Yehuda Ben-Zion教授以及Amir Allam博士给予很多帮助,匿名审稿专家提出了中肯的意见和修改建议,在此作者深表感谢。

#### 参考文献

- 程建远、李浙龙、张广忠等 2009, 煤矿井下地震勘探技术应用现状与发展展望, 勘探地球物理进展, 32(2), 96~100, 111。
- 丁志峰、王椿镛、杨建思等 2002, 昆仑山口西 8.1 级地震断裂带的地震探测, 中国地球物理学会年刊 2002——中国地球物理学会第十八届年会论文集, 458, 北京:地震出版社。
- 樊计昌、刘明军 2007, 确定断裂带内部结构和物性参数的一种方法, 石油地球物理勘探, 42(2), 164~169。
- 傅承义, 1965, 地球介质中的面波与导波(综述), 声学学报, 2(2), 49~55。
- 赖晓玲、李松林 2008, 汶川地震区平通镇断层围陷波探测, 大地测量与地球动力学, 28(6), 6~10。
- 赖晓玲、李松林、王旭 2009, 汶川地震区断层围陷波探测, 四川地震, 33(3), 8~15。
- 李松林、张先康、宋占隆等 2002, 昆仑山口断裂的通道波观测, 中国地震学会第九次学术大会论文摘要集——纪念李善邦先生百年诞辰, 132。
- 李松林、张先康、樊计昌 2005, 利用断层围陷波研究昆仑山口西 8.1 级地震破裂面, 地震学报, 27(1), 42~50。
- 李松林、赖晓玲、何加勇等 2007, 汤西断裂的断层围陷波初步研究, 地震地质, 29(2), 354~362。
- 刘明军、李松林、张先康等 2004, 海原断裂带断层通道波观测与破碎带宽度, 物探与化探, 28(6), 549~552。
- 楼海、王椿镛、丁志峰等 2006, 昆仑山断层围陷波的分析研究, 地球物理学报, 49(3), 788~796。
- 潘纪顺、张先康、姚志祥等 2009, 库赛湖-玛沁断裂带东段断层通道波的观测研究, 大地测量与地球动力学, 29(4), 21~25。
- 滕吉文, 1963, 地震波在直角断层模型介质中传播的动力学特性, 地球物理学报, 12(1), 75~92。
- 滕吉文 2007, 中国地球物理学研究面临的机遇、发展空间和时代的挑战, 地球物理学进展, 22(4), 1101~1112。
- 姚志祥、王椿镛、裴正林 2007, 昆仑山断裂带围陷波的有限差分数值模拟解释, 地球物理学报, 50(3), 760~769。
- 姚志祥、王椿镛、楼海 2010, 利用基于围陷波波形的网格搜索法确定昆仑山断裂带结构参数, 地球物理学报, 53(5), 1167~1172。



- 于景邨、刘志新、岳建华等, 2007, 煤矿深部开采中的地球物理技术现状及展望, *地球物理学进展*, **22**(2), 586 ~ 592.
- Aster R C, Shearer P M, Berger J, 1990, Quantitative measurements of shear wave polarizations at the Anza Seismic Network, southern California, Implications for shear wave splitting and earthquake prediction, *J Geophys Res*, **95**( B8 ), 12449 ~ 12473.
- Ben-Zion Y, 1989, The response of two joined quarter-spaces to SH line sources located at the material discontinuity interface, *Geophys J Int*, **98**(2), 213 ~ 222.
- Ben-Zion Y, 1990a, The response of two half-spaces to point dislocations at the material interface, *Geophys J Int*, **101**(3), 507 ~ 528.
- Ben-Zion Y, Aki K, 1990b, Seismic radiation from an SH line source in a laterally heterogeneous planar fault zone, *Bull Seism Soc Am*, **80**(4), 971 ~ 994.
- Ben-Zion Y, Malin P, 1991, San Andreas fault zone head waves near Parkfield, California, *Science*, **251**(5001), 1592 ~ 1594.
- Ben-Zion Y, Katz S, Leary P, 1992, Joint inversion of fault zone head waves and direct P arrivals for crustal structure near major fault, *J Geophys Res*, **97**( B2 ), 1943 ~ 1951.
- Ben-Zion Y, 1998, Properties of seismic fault zone waves and their utility for imaging low-velocity structures, *J Geophys Res*, **103**( B6 ), 12567 ~ 12585.
- Ben-Zion Y, Peng Z, Okaya D et al, 2003a, A shallow fault-zone structure illuminated by trapped waves in the Karadere-Duzce branch of the North Anatolian Fault, western Turkey, *Geophys J Int*, **152**(3), 699 ~ 717.
- Ben-Zion Y, Sammis C G, 2003b, Characterization of fault zones, *Pure Appl Geophys*, **160**(3 ~ 4), 677 ~ 715.
- Bennington N L, Thurber C, Peng Z et al, 2013, Incorporating fault zone head wave and direct wave secondary arrival times into seismic tomography, Application at Parkfield, California, *J Geophys Res*, **118**(3), 1008 ~ 1014.
- Bulut F, Ben-Zion Y, Bohnhoff M, 2012, Evidence for a bi-material interface along the Mudurnu segment of the North Anatolian fault zone from polarization analysis of P waves, *Earth and Planetary Science Letters*, **327 ~ 328**( ), 17 ~ 22.
- Cochran E S, Vidale J E, Li Y G, 2003, Near-fault anisotropy following the Hector Mine earthquake, *J Geophys Res*, **108**( B9 ), 2436, 1 ~ 11.
- Cochran E S, Li Y G, Vidale J E, 2006, Anisotropy in the shallow crust observed around the San Andreas Fault before and after the 2004 M6.0 Parkfield earthquake, *Bull Seism Soc Am*, **96**(4B), S364 ~ S375.
- Cochran E S, Li Y G, Shearer P M et al, 2009, Seismic and geodetic evidence for extensive, long-lived fault damage zones, *Geology*, **37**(4), 315 ~ 318.
- Cormier V F, Spudich P, 1984, Amplification of ground motion and waveform complexity in fault zones, examples from the San Andreas and Calaveras Faults, *Geophys J Int*, **79**(1), 135 ~ 152.
- Fohrmann M, Igel H, Jahnke G et al, 2004, Guided waves from sources outside faults, an indication for shallow fault zone structure? *Pure Appl Geophys*, **161**(11 ~ 12), 2125 ~ 2137.
- Fukao Y, Hori S, Ukawa M, 1983, A seismological constraint on the depth of basalt-eclogite transition in a subducting oceanic crust, *Nature*, **303**(5916), 413 ~ 415.
- Haberland C, Agnon A, El-Kelani R et al, 2003, Modeling of seismic guided waves at the Dead Sea Transform, *J Geophys Res*, **108**( B7 ), 2342, 1 ~ 7.
- Hori S, Inoue H, Fukao Y et al, 1985, Seismic detection of the untransformed 'basaltic' oceanic crust subducting into the mantle, *Geophys J R astr Soc*, **83**(1), 169 ~ 197.
- Hough S E, Ben-Zion Y, Leafy P, 1994, Fault-zone waves observed at the Southern Joshua Tree earthquake rupture zone, *Bull Seism Soc Am*, **84**(3), 761 ~ 767.
- Huang B S, Teng T L, Yeh Y T, 1995, Numerical modeling of fault-zone trapped waves, acoustic case, *Bull Seism Soc Am*, **85**(6), 1711 ~ 1717.
- Igel H, Ben-Zion Y, Leary P C, 1997, Simulation of SH and P-SV wave propagation in fault zones, *Geophys J Int*, **128**(3), 533 ~ 546.
- Igel H, Jahnke G, Ben-Zion Y, 2002, Numerical simulation of fault zone guided waves, accuracy and 3D effects, *Pure Appl Geophys*, **159**(9), 2067 ~ 2083.

- Jahnke G , Igel H , Ben-Zion Y , 2002 , Three-dimensional calculations of fault-zone guided waves in various irregular structures , *Geophys J Int* , **151**( 2 ) , 416 ~ 426.
- Julian B R , Evans J R , 2010 , On possible plume-guided seismic waves , *Bull Seism Soc Am* , **100**( 2 ) , 497 ~ 508.
- Karageorgi E , McEvelly T V , Clymer R , 1997 , Seismological studies at Parkfield IV , Variations in controlled-source waveform parameters and their correlation with seismicity , 1987 to 1995 , *Bull Seism Soc Am* , **87**( 1 ) , 39 ~ 49.
- Korneev V A , Nadeau R M , McEvelly T V , 2003 , Seismological studies at Parkfield IX , fault-zone imaging using guided wave attenuation , *Bull Seism Soc Am* , **93**( 4 ) , 1415 ~ 1426.
- Kurita T , 1975 , Attenuation of shear waves along the San Andreas fault zone in central California , *Bull Seism Soc Am* , **65**( 1 ) , 277 ~ 292.
- Leary P C , Li Y G , Aki K , 1987 , Observations and modeling of fault zone fracture seismic anisotropy-I , P , SV and SH travel times , *Geophys J R astr Soc* , **91**( 2 ) , 461 ~ 484.
- Lewis M A , Peng Z , Ben-Zion Y et al , 2005 , Shallow seismic trapping structure in the San Jacinto fault zone near Anza , California , *Geophys J Int* , **162**( 3 ) , 867 ~ 881.
- Lewis M A , Ben-Zion Y , McGuire J J , 2007 , Imaging the deep structure of the San Andreas Fault south of Hollister with joint analysis of fault zone head and direct P arrivals , *Geophys J Int* , **169**( 3 ) , 1028 ~ 1042.
- Lewis M A , Ben-Zion Y , 2010 , Diversity of fault zone damage and trapping structures in the Parkfield section of the San Andreas Fault from comprehensive analysis of near fault seismograms , *Geophys J Int* , **183**( 3 ) , 1579 ~ 1595.
- Li H , Zhu L , Yang H , 2007 , High-resolution structures of the Landers fault zone inferred from aftershock waveform data , *Geophys J Int* , **171**( 3 ) , 1295 ~ 1307.
- Li Y G , Leary P C , 1990a , Fault zone trapped seismic waves , *Bull Seism Soc Am* , **80**( 5 ) , 1245 ~ 1271.
- Li Y G , Leary P , Aki K et al , 1990b , Seismic Trapped modes in the Oroville and San Andreas Fault zone , *Science* , **249**( 4970 ) , 763 ~ 766.
- Li Y G , Vidale J E , Aki K et al , 1994 , Fine structure of the Landers fault zone , segmentation and the rupture process , *Science* , **265**( 5170 ) , 367 ~ 370.
- Li Y G , Vidale J E , 1996 , Low-velocity fault-zone guided waves , numerical investigations of trapping efficiency , *Bull Seism Soc Am* , **86**( 2 ) , 371 ~ 378.
- Li Y G , Ellsworth W L , Thurber C H et al , 1997 , Fault-zone guided waves from explosions in the San Andreas Fault at Parkfield and Cienega Valley , California , *Bull Seism Soc Am* , **87**( 1 ) , 210 ~ 221.
- Li Y G , Aki K , Vidale J E et al , 1998 , A delineation of the Nojima fault ruptured in the *M7.2* Kobe , Japan , earthquake of 1995 using fault zone trapped waves , *J Geophys Res* , **103**( B4 ) , 7247 ~ 7263.
- Li Y G , Vidale J E , Aki K et al , 1998 , Evidence of shallow fault zone strengthening after the 1992 *M7.5* Landers , California , earthquake , *Science* , **279**( 5348 ) , 217 ~ 219.
- Li Y G , Vernon F L , 2001 , Characterization of the San Jacinto fault zone near Anza , California , by fault zone trapped waves , *J Geophys Res* , **106**( B12 ) , 30671 ~ 30688.
- Li Y G , 2003 , Characterization of rupture zones at Landers and Hector Mine , California in 4-D by fault-zone guided waves , *Earth Science Frontiers* , **10**( 4 ) , 479 ~ 505.
- Li Y G , Vidale J E , Day S M et al , 2003 , Postseismic fault healing on the rupture zone of the 1999 *M7.1* Hector Mine , California earthquake , *Bull Seism Soc Am* , **93**( 2 ) , 854 ~ 869.
- Li Y G , Vidale J E , Cochran E S , 2004 , Low-velocity damaged structure of the San Andreas fault at Parkfield from fault zone trapped waves , *Geophys Res Lett* , **31**( 12 ) , L12S06 , 1 ~ 5.
- Liu Y , Teng T-L , Ben-Zion Y , 2004 , Systematic analysis of shear-wave splitting in the aftershock zone of the 1999 Chi-Chi , Taiwan , earthquake , shallow crustal anisotropy and lack of precursory variations , *Bull Seism Soc Am* , **94**( 6 ) , 2330 ~ 2347.
- Liu Y , Teng T-L , Ben-Zion Y , 2005 , Near-surface seismic anisotropy , attenuation and dispersion in the aftershock region of the 1999 Chi-Chi earthquake , *Geophys J Int* , **160**( 2 ) , 695 ~ 706.
- Lou M , Rial J A , Malin P E , 1997 , Modeling fault-zone guided waves of micro earthquakes in a geothermal reservoir ,

- Geophysics , **62**( 4 ) , 1278 ~ 1284.
- Malin P E , Lou M , Rial J A , 1996 , FR waves , A second fault-guided mode with implications for fault property studies , *Geophys Res Lett* , **23**( 24 ) , 3547 ~ 3550.
- Mamada Y , Kuwahara Y , Ito H et al , 2002 , 3-D finite-difference simulation of seismic fault zone waves—Application to the fault zone structure of the Mozumi-Sukenobu fault , central Japan , *Earth Planets Space* , **54**( 11 ) , 1055 ~ 1058.
- Mamada Y , Kuwahara Y , Ito H et al , 2004 , Discontinuity of the Mozumi-Sukenobu fault low-velocity zone , central Japan , inferred from 3-D finite-difference simulation of fault zone waves excited by explosive sources , *Tectonophysics* , **378**( 3 ~ 4 ) , 209 ~ 222.
- McGuire J , Ben-Zion Y , 2005 , High-resolution imaging of the Bear Valley section of the San Andreas fault at seismogenic depths with fault-zone head waves and relocated seismicity , *Geophys J Int* , **163**( 1 ) , 152 ~ 164.
- Mizuno T , Nishigami K , Ito H et al , 2004 , Deep structure of the Mozumi-Sukenobu fault , Central Japan , estimated from the sub surface array observation of fault zone trapped waves , *Geophys J Int* , **159**( 2 ) , 622 ~ 642.
- Mizuno T , Nishigami K , 2006 , Deep structure of the Nojima Fault , southwest Japan , estimated from borehole observations of fault-zone trapped waves , *Tectonophysics* , **417**( 3 ~ 4 ) , 231 ~ 247.
- Mooney W D , Ginzburg A , 1986 , Seismic measurements of the internal properties of fault zones , *Pure Appl Geophys* , **124**( 1/2 ) , 141 ~ 157.
- Nakamura T , Takenaka H , 2006 , A numerical analysis of seismic waves for an anisotropic fault zone , *Earth Planets Space* , **58**( 5 ) , 569 ~ 582.
- Nishigami K , Ando M , Tadokoro K , 2001 , Seismic observations in the DPRI 1800m borehole drilled into the Nojima Fault zone , south-west Japan , *Island Arc* , **10**( 3 ~ 4 ) , 288 ~ 295.
- Ozakin Y , Ben-Zion Y , Aktar M et al , 2012 , Velocity contrast across the 1944 rupture zone of the North Anatolian fault east of Ismetpasa from analysis of teleseismic arrivals , *Geophys Res Lett* , **39**( 8 ) , L08307 , 1 ~ 6.
- Peng Z , Ben-Zion Y , Michael A J et al , 2003 , Quantitative analysis of seismic fault zone waves in the rupture zone of the 1992 Landers , California , earthquake , evidence for a shallow trapping structure , *Geophys J Int* , **155**( 3 ) , 1021 ~ 1041.
- Peng Z , Ben-Zion Y , 2004 , Systematic analysis of crustal anisotropy along the Karadere-Düzce branch of the North Anatolian fault , *Geophys J Int* , **159**( 1 ) , 253 ~ 274.
- Peng Z , Ben-Zion Y , 2006 , Spatiotemporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 *M*<sub>7.4</sub> İzmit and *M*<sub>7.1</sub> Düzce , Turkey , earthquake sequences , *Geophys J Int* , **160**( 3 ) , 1027 ~ 1043.
- Rovelli A , Caserta A , Marra F et al , 2002 , Can seismic waves be trapped inside an inactive fault zone? The case study of Nocera Umbra , Central Italy , *Bull Seism Soc Am* , **92**( 6 ) , 2217 ~ 2232.
- Shapiro N M , Campillo M , Singh S K et al , 1998 , Seismic channel waves in the accretionary prism of the Middle America Trench , *Geophys Res Lett* , **25**( 1 ) , 101 ~ 104.
- Shapiro N M , Olsen K B , Singh S K , 2000 , Wave-guide effects in subduction zones , evidence from three-dimensional modeling , *Geophys Res Lett* , **27**( 3 ) , 433 ~ 436.
- Wang C-Y , Mooney W D , Ding Z et al , 2009 , Shallow seismic structure of Kunlun fault zone in northern Tibetan Plateau , China , implications for the 2001 *M*<sub>s</sub> 8.1 Kunlun earthquake , *Geophys J Int* , **177**( 3 ) , 978 ~ 1000.
- Wu J , Hole J A , Snoke J A et al , 2008 , Depth extent of the fault-zone seismic waveguide , effects of increasing velocity with depth , *Geophys J Int* , **173**( 2 ) , 611 ~ 622.
- Yang H , Zhu L , 2010 , Shallow low-velocity zone of the San Jacinto fault from local earthquake waveform modelling , *Geophys J Int* , **183**( 1 ) , 421 ~ 432.
- Yang H , Zhu L , Cochran E S , 2011 , Seismic structures of the Calico fault zone inferred from local earthquake travel time modeling , *Geophys J Int* , **186**( 2 ) , 760 ~ 770.
- Zhang Z , Schwartz S Y , 1994 , Seismic anisotropy in the shallow crust of the Loma Prieta segment of the San Andreas Fault System , *J Geophys Res* , **99**( B5 ) , 9651 ~ 9661.
- Zhao P , Peng Z , 2008 , Velocity contrast along the Calaveras fault from analysis of fault zone head waves generated by repeating

earthquakes , *Geophys Res Lett* , **35**( 1) , L01303 , 1 ~ 5.

Zhao P , Peng Z , Shi Z et al , 2010 , Variations of the velocity contrast and rupture properties of *M*6 earthquakes along the Parkfield section of the San Andreas fault , *Geophys J Int* , **180**( 2) , 765 ~ 780.

## Prospects and current studies on the fault zone seismic waves

*Zheng Jianchang*<sup>1 2)</sup>

1) Department of Earth Science , University of Southern California , Los Angeles CA 90089 , USA

2) Earthquake Administrations of Shandong Province , Jí'nan 250014 , China

**Abstract** Deep structure and material properties of faults can be understood by observing and simulating particular phases in fault fracture zones. This paper gives a review on the development of the fault-zone seismic waves in the seismological domain. The present research status of fault-zone head wave and trapped wave are summarized systematically. Based on the recent progress in this field , the paper discusses the prospects on the utilization of seismic wave in fault structure researches.

**Key words:** Fault-zone head wave    Trapped waves    Low velocity structure    Fault material characteristics    Fault zone anisotropy