



正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制

谭云亮 谭涛 张修峰 陈洋

引用本文:

谭云亮, 谭涛, 张修峰, 等. 正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 214–223.

TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng. Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214–223.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1343>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

正断层上盘开采断层附近应力时空分布数值模拟

Numerical simulation of spatiotemporal distributions of stresses in vicinity of normal fault due to mining within hanging wall

煤炭科学技术. 2023, 51(3): 61–67 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2019-0516>

动压影响下断层构造应力场和能量场分布特征

Stress field and energy field distribution characteristics of faults under dynamic pressure

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/2a34958a-3965-486d-a469-3b063c1e26cb>

大倾角过断层综采工作面支架失稳机理及控制技术

Mechanism and control technology of support instability in fully-mechanized mining face in thick coal seam with large dip angle and fault

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 16–22 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d602a4ea-91fc-4576-97ce-e8db6893dc71>

井下断层活动的定量监测及其对冲击地压的影响研究

Research on quantitative monitoring of underground fault activity and its influence on rock burst

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 10–22 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1140>

采动影响下断层活化失稳及能量释放规律研究

Study on law of fault activation, failure and energy release under influence of mining

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 75–83 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/def8c440-b2f2-42a1-8128-263b30c3ebb3>

断层对煤层瓦斯封闭性定量方法研究

Research on the quantitative method of fault sealing to coal seam gas

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 193–203 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1516>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

谭云亮, 谭涛, 张修峰, 等. 正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 214–223.
TAN Yunliang, TAN Tao, ZHANG Xiufeng, *et al.* Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 214–223.

正断层两盘动力灾害显现差异性及其机制

谭云亮^{1,2}, 谭涛^{1,2}, 张修峰³, 陈洋³

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014)

摘要:随着大范围采矿活动的进行, 正断层易滑动失稳产生震动波, 并在断层两侧区域呈现出显著不对称动力响应特征。为解释山东新巨龙能源有限责任公司发生“2·22”冲击地压事故破坏区域主要集中在FD8断层上盘区域而下盘几乎没有出现动力破坏这一现象, 从理论上分析了断层面(带)隔震的基本力学机理, 基于波场及能量分解建立起了弹性波在断层面(带)界面波场分解能量系数模型, 通过不同倾角断层面、不同破碎带厚度对震动波阻隔性数值模拟, 并对正断层两盘活动性差异进行了分析。研究表明, 对于一个相对孤立正断层(非断层组)而言随着断层倾角的增大, 正断层上盘内的震动波沿着断层面“透射”将明显降低, 呈现出显著的“隔震”特性, 即当正断层上盘滑动诱发震动波难以穿过断层传播至下盘; 地下正断层两盘活动差异性即断层上盘下降滑动、下盘不动2个方面揭示了正断层两盘动力灾害显现差异性动力学机制, 为科学认知正断层活动诱灾机制提供了参考, 并为在地下采矿中正断层诱灾防控策略提供了理论依据。

关键词:断层失稳; 冲击地压; 正断层两盘; 断层倾角; 震动波; 动力显现

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0214-10

Difference and mechanism of dynamic behaviors between two walls of normal fault

TAN Yunliang^{1,2}, TAN Tao^{1,2}, ZHANG Xiufeng³, CHEN Yang³

(1. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Shandong Energy Group Co., Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: With the development of large-scale mining activities, the normal fault is prone to slide and instability, resulting in vibration waves, which show significant asymmetric dynamic response characteristics in the areas on both sides of the fault. In order to solve the phenomenon that the “2·22” rock burst accident occurred in Shandong Xin Julong Energy Co., Ltd., the damage area is mainly concentrated in the FD8 fault hanging wall, but almost no dynamic damage in the footwall, it was theoretically analyzed the basic mechanical mechanism of fault plane (belt) isolation, by establishing an energy coefficient model of elastic wave field decomposition at along fault plane, based on the wave field and energy decomposition; numerically simulations for vibration wave barrier of fault plane with different dip angles and different fracture zone thickness were done; and it was also analyzed the activity difference between the two walls of normal fault. The investigations showed that for a relatively isolated normal fault (non fault group), with the increase of fault dip angle, the “transmission” of seismic waves in the hanging wall of the normal fault along the fault plane will be significantly reduced, showing a significant “isolation” characteristic. Also, the activity is different between two walls of normal fault, i.e. the hanging wall slides downward instead of the footwall slides upward. Thus, the dynamic mechanism of the difference between the two walls was revealed. It provides a

收稿日期: 2022-08-10

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1343

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074168); 山东省深地资源勘查开采重大专项资助项目 (2019SDZY02); 山东省泰山学者攀登计划资助项目 (tspd20210313)

作者简介: 谭云亮 (1964—), 男, 山东临朐人, 教授, 博士生导师。E-mail: yunliangtan@163.com

通讯作者: 谭涛 (1977—), 男, 广西河池人, 讲师, 博士。E-mail: tantaolive@163.com

reference for scientific cognition of the mechanism of normal fault induced disaster, and provides a strategy for the prevention and control of normal fault induced disaster in underground mining

Key words: fault instability; impact ground pressure; two walls of a normal fault; fault dip angle; seismic wave; dynamic behavior

0 引 言

含断层面(带)场地是矿山开采过程中的常见场地,在沿空巷道毗邻采空区,在回采扰动影响下,正断层尤其是高角度正断层极易活化促使上盘产生滑移,容易诱发区域性动力灾害。断层面(带)因其在地壳表层结构里产生不连续界面,地震波通过非发震断层的情况与均匀介质中的情况是不一样的,断层面(带)可能改变通过的地震波使断层两侧的地震波发生某种变化。有效揭示断层面(带)震动波的传播规律,特别是断层面(带)是否具有“震性”对于防治由震动波诱发的动力灾害至关重要。

对于断层产状地对地震响应影响的基本特征、解析描述方法和数值分析方法,许多学者在这方面做了大量的工作。

断层面产状地对地震响应的影响,最早为 20 世纪 60 年代以前,由于受前苏联学者麦德维捷夫的影响,工程界基本认为将断层面(带)场地作为不利场地,认为断层会提高震动烈度。到了 20 世纪 70 年代,胡聿贤院士等^[1]在通海地震等地震实地考察中,总结了一套断层产状等场地因素对地震动的影响的研究方法,得出了与断层提高烈度的观点截然不同的结论。大量工程监测统计,如美国北岭地震^[2]、我国台湾集集断层型地震^[3]、汶川大地震^[4-6]调查分析断层地的震动很可能同时存在方向性效应和上盘效应,即上盘地震动加速度峰值比(竖向/水平向)明显高于下盘,竖向地震动尤为剧烈的结论。

通过解析方法揭示地震波沿着断层面(或带)传播规律,对认知断层诱发地震机理至关重要。一方面由于断层带存在比如节理、软弱夹层、裂隙介质等将会导致地震波传播的衰减^[7],采用位移不连续方法可以有效地震波传播的裂隙效应^[8]采用数学力学方法揭示传播速度及其衰减规律^[9-10];软弱夹层的透射性^[11]、节理面隔振性能^[12-13]等。另一方面,基于波动力学理论研究了地震波在单断层岩体中的传播和所诱发的地面运动,分析了断层刚度、断层走向、入射角和入射波频率对地震动峰值质点速度的影响^[14],对于加深理解断层产状影响地震响应的力学机制至关重要。

采用数值方法揭示断层产状对地震响应的影响成为主要手段之一。从低速断层带模型中波传播进

行特征^[15-17],地震波因往复反射而在低速带区域形成隔震效应^[18],断层破碎带和输入波特性等对加速度和反应谱的影响^[19],断层带深度及宽度对地震波传播^[20]影响;同时,利用数值方法可以对对不规则断裂带弹性波传播发生多次反射现象以及断层带宽度对陷波产生的影响^[21]进行定量揭示。近些年来,采用数值模拟方法揭示断层对场地地震动的影响成为热点,所采用的计算方法包括:显式有限元法^[22-23]、离散波数法^[24]、边界元法^[25]、复响应有限元方法^[26-27]、有限差分法^[28]和伽辽金法^[29-30]等。

长期以来,在煤矿普遍认为正断层两盘区域均存在较大冲击地压风险。然而新巨龙煤矿发生的“2·22”冲击地压事故现场实地考察发现,断层上盘和下盘区域动力灾害产生破坏程度截然不同。为揭示因正断层活动滑移造成两盘致灾差异性机制,针对矿区尺度断层(落差 200 m 之内),从弹性波在 2 种不同力学介质界面处传播的波场分解和能量分配角度,揭示断层面(带)的震动波阻隔作用力学机理,并应用 LS-Dyna 显式有限元分析软件进行数值模拟分析不同倾角断层面(带)对震动波阻隔与震动响应特征,同时还分析断层两盘活动性差异,为断层构造两盘动力灾害差异性防控提供依据。

1 断层两盘动力灾害显现差异性实例

2020 年 2 月 22 日 6 时 17 分 22 秒,山东新巨龙能源有限责任公司(以下简称新巨龙公司)-810 m 水平二采区南翼 2305S 综放工作面上平巷发生了一起较大冲击地压事故,496 m 巷道发生不同程度破坏(上平巷 430 m,三联巷 66 m),其中严重破坏段 118 m,造成 4 人遇难。现场勘察发现,以 FD8 断层为界,动力显现具有明显分区性,破坏区域为处于 FD8 断层上盘的上平巷和三联巷上部;自 FD8 断层面至下平巷 230 m 处于断层下盘范围以及整个下平巷均无破坏显现(图 1a),且微地震监测到大能量事件也主要集中在断层上盘区域(图 1b)。事故发生后,现场勘察表明,FD8 高角度正断层上盘滑动(下盘不动),断层面表现出很强的“隔震性”。

事故调查分析表明,导致本次冲击地压事故主要原因是沿空侧 FD8 断层与 2305 工作面斜交,由于邻 2304 采空区对断层上盘的“约束”减弱,加上工作面开采剩余支承三角煤柱尺寸逐步减小,应力集中

程度高,同时断层上盘活动滑移产生动载,导致本次冲击地压事故的发生。

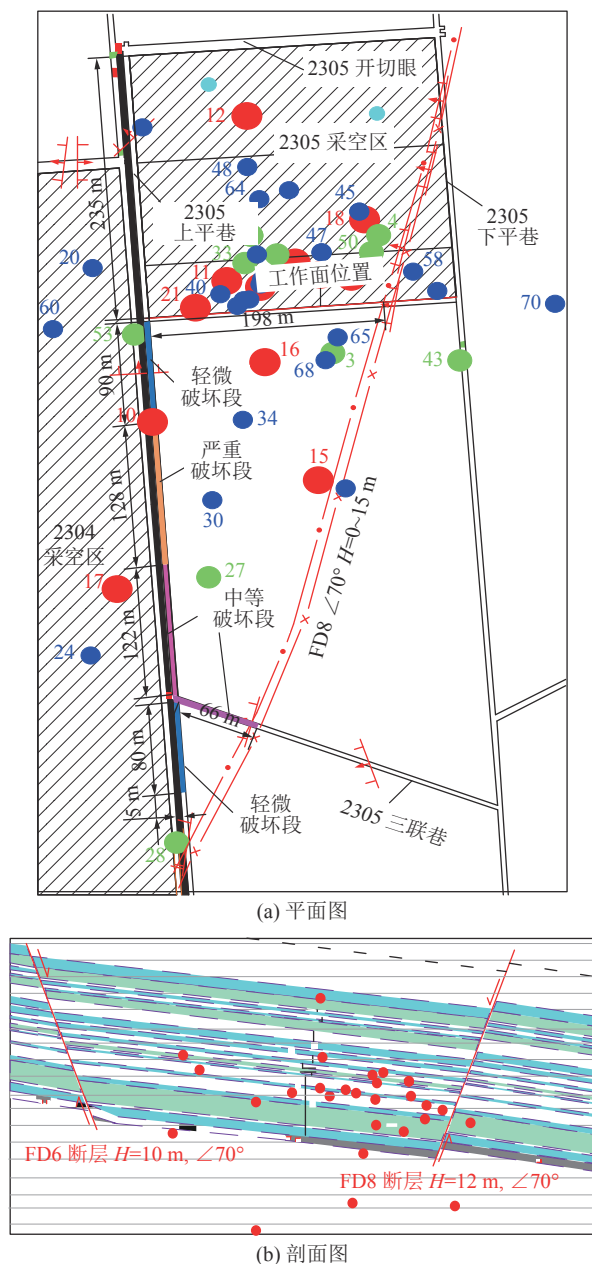


图1 新巨龙公司“2020·2·22”冲击地压事故微地震事件分布

Fig.1 Distribution of micro earthquake events of “2020·2·22” rock burst accident of Shandong New Dragon Co., Ltd.

2 断层面隔震力学机理

2.1 弹性波沿断层面波场分解

为了分析方便,假设断层面充填物质均匀分布且本构关系为线弹性。由于断层面因其弹性模量较小、强度较低,与周围岩石物理力学性质差异较大,当冲击波入射到断层面时将会产生波场分解,通过

透射、反射作用,产生“隔震”效应。

当弹性波入射到两种不同力学介质的界面上时,由于界面两侧介质弹性性质的差异,弹性波将会产生反射和折射现象,弹性界面不仅改变波传播的几何路径,而且将引起弹性波场能量的重新分配。弹性波按照波的传播方向与粒子运动方向不同,分为纵波(亦称P波)和横波(亦称S波,又可分解为SH波和SV波)。其中SH波,因其偏振方向与整个界面垂直,故也永远与波阻抗面垂直,所以无关入射角度,不会产生转换波,波场的复杂程度相对较低;而SV波在波阻抗面的反射、透射及转换与P波类似。以P波为例,分析弹性波通过断层面的传播特性。当一个平面P波入射到两种介质交界面上时,一般会同时产生两个反射波和两个透射波^[31-32]。考虑在 xz 平面内弹性波的传播问题,交界面取 xy 平面,如图2所示。现假设介质A中有一个平行于 xz 平面且与 z 轴的夹角为 α_0 的P波,入射到介质A和介质B的交界面上,其谐波位移场为 $u_p(x, z, t)$,此时会同时反射一个P波和一个SV波(以下简称S波),设其反射角度分别为 β_1 和 γ_1 ,谐波位移场分别为 $u_{RS}(x, z, t)$ 和 $u_{RP}(x, z, t)$,同时会透射到介质B中一个P波和一个S波,设其反射角度分别为 β_2 和 γ_2 ,谐波位移场分别为 $u_{TS}(x, z, t)$ 和 $u_{TP}(x, z, t)$ 。

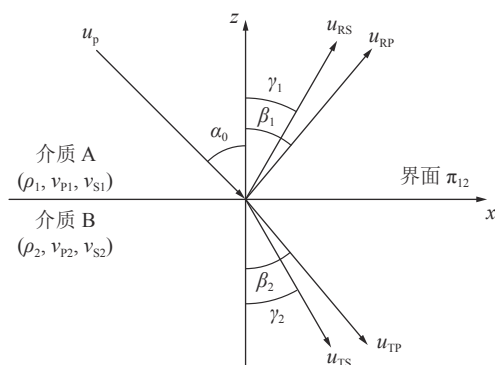


图2 弹性波透过两种不同力学介质界面波场分解

Fig.2 Separation of elastic wave through interface of two different mechanical media

对于具有一定厚度的断层面而言,断层面的两侧往往是较好的波阻抗分界面,当弹性波传播从某一侧界面射入时,所产生的两个透射波在断层面(带)内传播,当达到另一侧界面时,每一个透射波将会同时产生新的两个反射波和两个透射波,如图3所示。

从图3可知,假设入射波从右侧界面 π_{12} 向左侧界面 π_{21} 方向传播,当弹性波通过右侧界面 π_{12} 入射后,所产生的两个透射波抵达左侧界面 π_{21} 处,产生新的反射波在断层面内部继续传播,抵达右侧界面 π_{12} 后

又将产生新的反射波,从而使得这些反射波在左右两个界面 π_{12} 、 π_{21} 之间处被多次分解反射回断层,从而起到了“隔震”效果。通过断层两侧界面的射线路径主要有 4 条,即 P-P, P-S, S-P, S-S, 于是通过断层面的任何一点波场 $u(x, z, t)$ 主要由上述 4 类波场叠加而成。

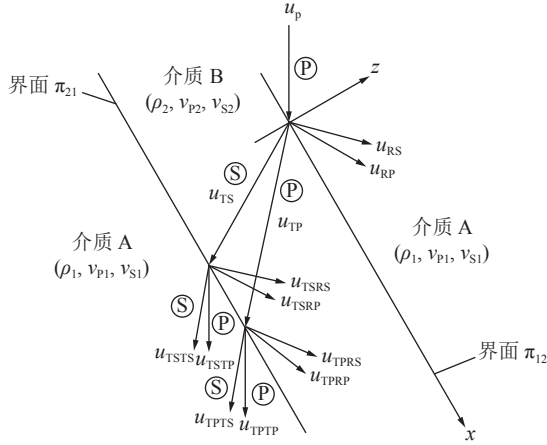


图 3 弹性波透过断层(带)界面波场分解

Fig.3 Separation of elastic wave through interfaces of fault fracture zone

$$u = u_{TPTP1} + u_{TSTP3} + u_{TPTS2} + u_{TSTS4} \quad (1)$$

假设断层面两侧界面 π_{12} 、 π_{21} 互相平行,由 Snell 定律可知, u_{TPTP} 和 u_{TSTP} 的方向互相平行, u_{TPTS} 和 u_{TSTS} 的方向互相平行,亦即透射到左侧界面 π_{21} 的弹性波, P 波的方向互相平行, S 波方向互相平行。从而,断层左侧任何一点波场 $u(x, z, t)$ 主要由 P 波和 S 波叠加而成(图 4),即:

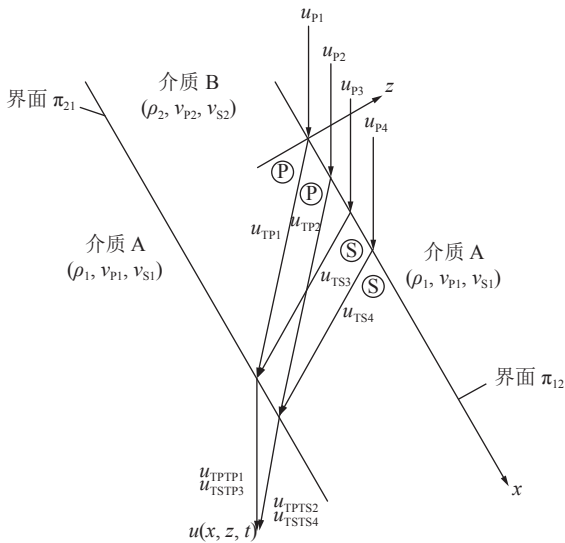


图 4 弹性波透过断层(带)的透射模型

Fig.4 Transmission model for elastic wave through interfaces of fault fracture zone

$$u = u_P + u_S \quad (2)$$

式中: $u_P = u_{TPTP1} + u_{TSTP3}$, $u_S = u_{TPTS2} + u_{TSTS4}$ 。

尽管通过断层(带)的任何一点波场 $u(x, z, t)$ 主要由上述 4 类波场叠加而成,但这 4 条路径存在一定的相位差。因为每一类波场都是由入射 P 波分解成透射波传播而来的,入射波每经过一次分界面之后,能量都进行了 2 次分配,反射波的能量无法穿透界面,从而使得波场 $u(x, z, t)$ 的震动强度出现降低现象,而衡量波场震动强度的强弱,则可以从弹性波能量的角度进行考量。

2.2 弹性波在断层面能量分配

考虑图 2 所示的弹性波在 2 种不同力学介质界面处的传播问题,引入位移势函数 ϕ 和 χ ,则位移可以表达为

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \chi}{\partial z}, \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \chi}{\partial x} \quad (3)$$

通过位移连续边界条件、应力平衡边界条件以及 Snell 定律,可以确定出位移势函数中各振幅之间的比例关系,亦即弹性波入射到 2 种不同力学介质界面上的反射系数和透射系数,该系数可通过求解 Knott 方程确定,记 y 为基于位移势函数表示的反、透射系数。在平面 P 波入射条件下,

$$y = [T_{PP} \quad T_{PS} \quad R_{PP} \quad R_{PS}]^T \quad (4)$$

式中: T_{PP} 为 P-P 透射系数; T_{PS} 为 P-S 透射系数; R_{PP} 为 P-P 反射系数; R_{PS} 为 P-S 反射系数。

在平面 S 波入射条件下,

$$y = [T_{SP} \quad T_{SS} \quad R_{SP} \quad R_{SS}]^T \quad (5)$$

式中: T_{SP} 为 S-P 透射系数; T_{SS} 为 S-S 透射系数; R_{SP} 为 S-P 反射系数; R_{SS} 为 S-S 反射系数。

为了便于研究断层面隔震效果与入射角度关系,考虑当弹性波从右侧界面 π_{12} 向断层面入射的情形,定义各个分解波场的能量系数为

$$\eta_k = \frac{\rho_k \cot \alpha_k}{\rho_0 \cot \alpha_0} y_k^2 \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (6)$$

式中: α_0 和 ρ_0 分别为入射波与界面 π_{12} 处法线的夹角及传播介质的密度; α_k 和 ρ_k 分别为入射波分解后的透射 P 波、透射 S 波、反射 P 波、反射 S 波与界面处法线的夹角及传播介质的密度。能量系数的物理含义为:入射波以某个角度入射界面后,各类分解弹性波与入射波的动强度之比,可记: $E_{TP} = \eta_1$, $E_{TS} = \eta_2$, $E_{RP} = \eta_3$, $E_{RS} = \eta_4$ 。

当入射波分解后的透射 P 波和透射 S 波抵达断层另一侧界面 π_{21} 处时,波场能量将再一次分解,定义此时波场能量系数为

$$\eta'_k = \frac{\rho'_k \cot \alpha'_k}{\rho'_0 \cot \alpha'_0} y_k^2 \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

式中: α'_0 和 ρ'_0 分别为首次分解后透射波(P波或者S波)与界面 π_{21} 处法线的夹角及传播介质的密度; α'_k 和 ρ'_k 分别为透射波再次分解后的透射P波、透射S波、反射P波、反射S波与界面处法线的夹角及传播介质的密度; η'_k 为透射波再次分解后各个波场的能量系数。

因此,当弹性波从右侧界面 π_{12} 入射,在断层面(带)内传播后,从左侧界面 π_{21} 透射出时,波场经过的路径为:P-P, P-S, S-P, S-S。假设断层面(带)两侧界面 π_{12} 、 π_{21} 互相平行,由 Snell 定律以及前述公式,可定义波场能量系数为

$$\eta_{ij} = \frac{\cot \alpha'_j}{\cot \alpha'_0} y_i^2 y_j^2 \quad (i = 1, 2; j = 1, 2) \quad (8)$$

可记: $E_{TPP} = \eta_{11}$, $E_{TPS} = \eta_{12}$, $E_{TSP} = \eta_{21}$, $E_{TSS} = \eta_{22}$ 。

若取参数为 $\rho_1/\rho_2 = 1.32$, $v_{P1}/v_{P2} = 1.91$, $v_{S1}/v_{S2} = 1.61$ 的断层面(带)夹层,当入射波为P波从右侧界面 π_{12} 入射时,可计算出各类波场能量系数 E_{TP} , E_{TS} , E_{RP} , E_{RS} , 如图 5 所示。图中各类曲线变化趋势表明,在入射角度较小条件($\alpha_0 \leq 22^\circ$)下,能量主要集中在透射P波,大约占 82%,其余 18% 能量集中在反射P波;随着入射角度增大,透射P波能量和反射P波能量均缓慢下降,但能量仍然集中在透射P波上,透射S波能量和反射S波能量缓慢上升;当入射角为 66° 时,透射P波能量还能占总能量的 70%,随着入射角的增加,透射P波能量开始迅速减少,反射P波能量迅速增加;当入射角超过 80° ,即入射波与界面法线接近垂直时,透射P波能量急剧减少,反射P波能量急剧增加,能量主要集中在反射P波。可见,当入射波接近于界面法线时,绝大部分能量因反射而被阻隔。

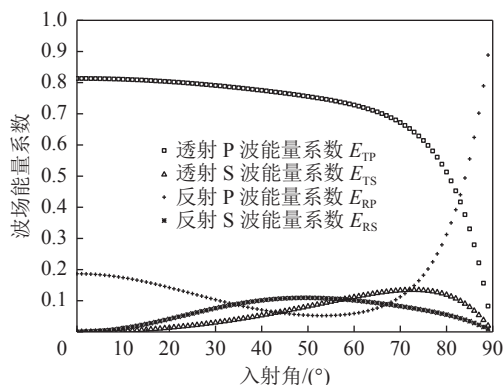


图 5 波场能量系数与入射角度的关系

Fig.5 Relationship between wave field energy coefficient and incident angle

当透射波抵达另一侧界面 π_{21} 处并穿透夹层时,波场经过的路径为:P-P, P-S, S-P, S-S, 根据式 (8), 计算出各类波场能量系数 E_{TPP} , E_{TPS} , E_{TSP} , E_{TSS} , 如图 6 所示。从图中的曲线可以看出,在入射角度较小条件($\alpha_0 \leq 22^\circ$)下,大部分的能量还是集中在 P-P 路径上,比例为 50%~66%,与首次抵达第一侧界面 π_{12} 时,相比大约减少了 15%。随着入射角度增大, P-S 路径能量有所上升,但基本都不超过 10%,而且 S-P 路径的能量系数极小。当入射角增加至 70° 时, P-P 路径的能量开始急剧下降,超过 75° 之后,其余路径的能量不再增加并逐渐减小,最终趋向于 0。

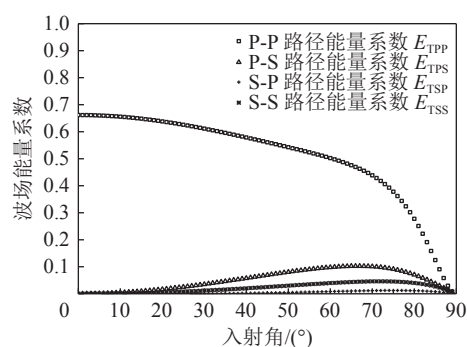


图 6 透过破碎夹层的波场能量系数与入射角度的关系

Fig.6 Relationship between wave field energy coefficient through fracture fault and incident angle

3 断层面倾角及破碎带厚度对震动波传播透射影响

通过前面理论分析,我们揭示了断层面隔震的基本力学机理,从能量分解的角度分析了弹性波入射角度对隔震效应的影响,然而由于弹性波在断层面内传播涉及多次反射问题,理论分析虽然是可行的,但是在数值计算上会比较繁琐。同时地层结构还存在分层问题,各个岩层介质的力学性质不尽相同,用解析方法分析断层面(带)的隔震特性往往不太现实。

为了揭示断层倾角、断层面厚度等因素对断层场地冲击应力波的影响,采用 LS-Dyna 软件建立起不同断层产状的无限半空间场地模型。参照龙固煤矿地质条件,选取中砂岩、粉砂岩、细砂岩、粉砂岩、中砂岩共 5 层进行建模,计算区域长度、宽度和高度分别为 800、240、180 m(图 7)。为计算方便,假定各岩层与断层带为均质、各向同性材料,各岩层材料参数见表 1。断层带弹性模量为 5.156 GPa、泊松比为 0.357、密度为 $2\,200\text{ kg/m}^3$,断层面厚度取 2 m。

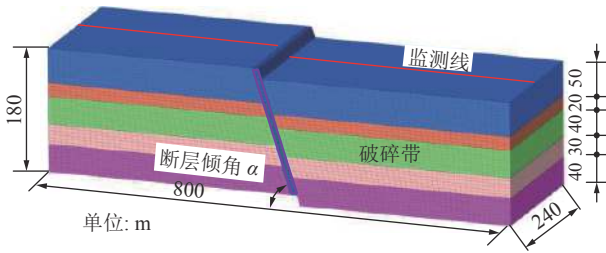


图 7 有限元计算网格模型
Fig.7 Finite element mesh model

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of material

| 岩层 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 厚度/m |
|-----|----------|-------|--------------------------------------|------|
| 中砂岩 | 41.851 | 0.176 | 2 500 | 50 |
| 粉砂岩 | 2.246 | 0.221 | 2 700 | 20 |
| 细砂岩 | 5.014 | 0.199 | 2 600 | 40 |
| 粉砂岩 | 2.246 | 0.221 | 2 700 | 30 |
| 中砂岩 | 41.851 | 0.176 | 2 500 | 40 |

断层面与左右两侧围岩之间分别设立接触面,法向接触模型设置为硬接触,切向接触模型设置为罚接触,摩擦因数均设置为 0.4。左右围岩两端设置无反射位移对称性边界,左半部分围岩底部设置无

反射位移边界,左右围岩的顶部均为无反射自由边界,右半部分围岩底部无约束(模拟采空区)。为了模拟断层上盘滑动产生震动波,即考察在断层上盘活动性带来的影响,在右半部分整体施加一个方向竖直向下、瞬间初速度大小为 4 m/s 的冲击载荷作用,该冲击作用持续时间为 1 s,监测上下两盘的弹性波传播情况。在左右围岩上表面中线位置(图 7 所示的检测线),从断面面所处位置起,沿着检测线每隔 5 m 分别布置相应的监测点。

3.1 断层面倾角对震动波传播透射影响

近似取断层面厚度 2 m,断层倾角 α 为 30° 、 45° 、 60° 和 80° 时断层上下两盘监测点动力加速度的变化,如图 8 所示。从图 8 可知,当断层倾角为 30° 时,左下盘监测点的动力加速度时程曲线震荡较为剧烈,曲线峰值较大,大小为 8.13 m/s^2 ,曲线绝对值的平均值较大;随着断层倾角的增大,曲线震荡逐渐减弱,当断层倾角达到 60° 时,尽管曲线有一定的峰值(大小为 1.74 m/s^2),但曲线变化基本上趋向于平缓;当断层倾角达到 80° 时,曲线基本上趋向于一条水平线,曲线绝对值的平均值趋向于 0,这说明正断层滑移引起的震动波在断层倾角达到一定量值时将无法透射断层面。

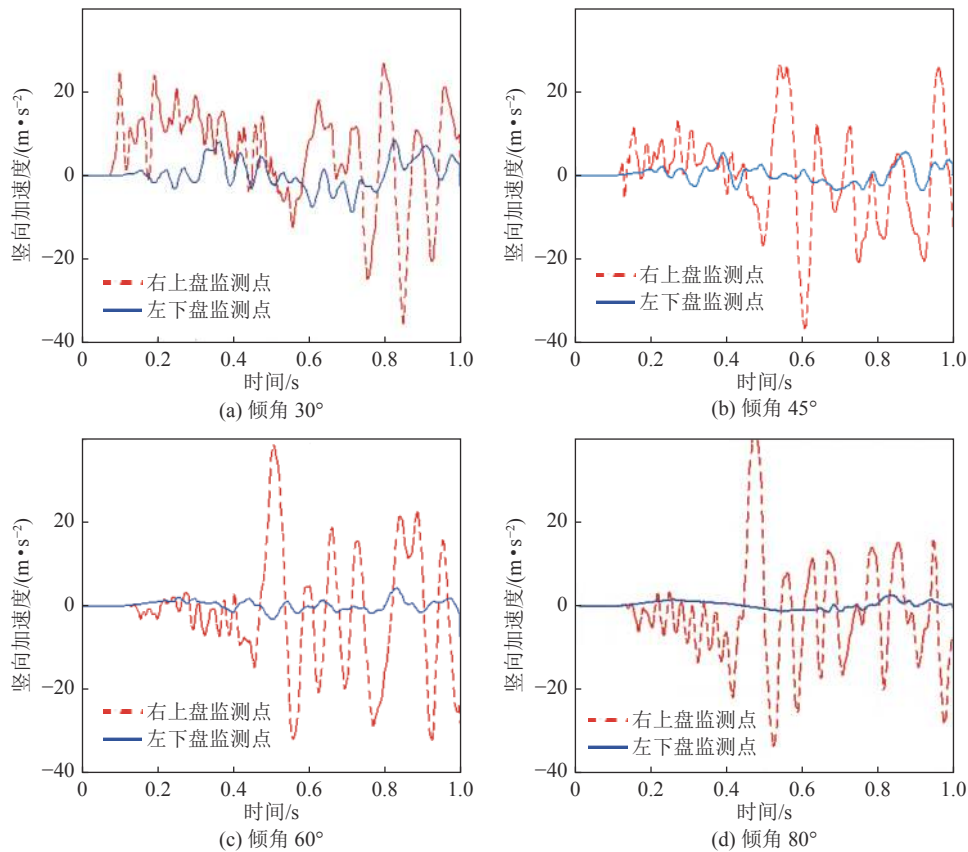


图 8 断层倾角对加速度阻隔性影响
Fig.8 Influence of fault's dip angle on acceleration

为考察能量倾角对能量阻隔的影响,对断层上下两盘整个区域分别计算整体平均能量密度,断层上下两盘整体平均能量密度变化如图9所示。从图中可知,当断层倾角为 30° 时,断层带的平均能量密度较大,当断层倾角增加到 80° 时,断层面的平均能量密度明显变小,说明随着断层倾角的增加,断层面所传递的平均能量密度将大幅度地减小。这也说明断层倾角达到一定量值时,断层面带)所传递的能量密度较小,将无法从上盘传递到下盘。

3.2 断层破碎带厚度对震动波传播透射影响

若取破碎带厚度分别为20 m和40 m,仍以断层倾角 α 为 30° 、 45° 、 60° 和 80° 对比分析,下盘监测点动力加速度的变化如图10所示。由图10可知,对于不同厚度的破碎带,左下盘同一个监测点动力加速度曲线变化基本保持一致;不管是在哪个断层倾角下,对于厚度较大的破碎带,其动力加速度曲线震荡幅度比厚度较小的破碎带要小一些,但不是很显著,约为后者的80%左右,厚度因素对“隔震”效果不明显。相对来说,与断层倾角相比,断层破碎带厚度对“隔震”影响偏弱。

对于不同厚度的破碎带,左下盘的平均能量密度变化如图11所示。从图11可知,对于厚度较大

的破碎带,其传递到左下盘的平均能量密度较小,对于厚度较小的破碎带,其传递到左下盘的平均能量密度较大,但厚度因素对该数值的变化不是很显著。从这个角度来说,与断层倾角相比,断层破碎带厚度对“隔震”影响也是偏弱的。

应当指出,一方面,本文所采用震动波P波沿着断层面透射传播特征初步揭示新巨龙公司“2·22”冲击地压显现沿着断层两盘的分区性的力学机制;另一方面,也不同类型地震波沿着不同类型断层面的反射、透射规律引起断层两盘动力显现差异性规律,十分复杂,需要进行深入研究。因此,本文研究工作还很浅,属于抛砖引玉。

4 断层两盘活动性差异讨论

从断层形成来看,其机制十分复杂。一般认为,当岩石受力超过其强度便开始破裂,随着破裂的扩展形成明显断层面,即断层两盘可以滑动的破裂面。一旦断层面形成且断层面所受的剪应力超过摩擦阻力时,断层两盘就相对滑动形成断层。对于正断层,其形成的基本机制是,对于三维应力状态最大主应力 σ_1 (垂直方向)、最小主应力 σ_3 (水平方向,垂直于断层走向)、中间主应力 σ_2 (水平方向,平行于断层走

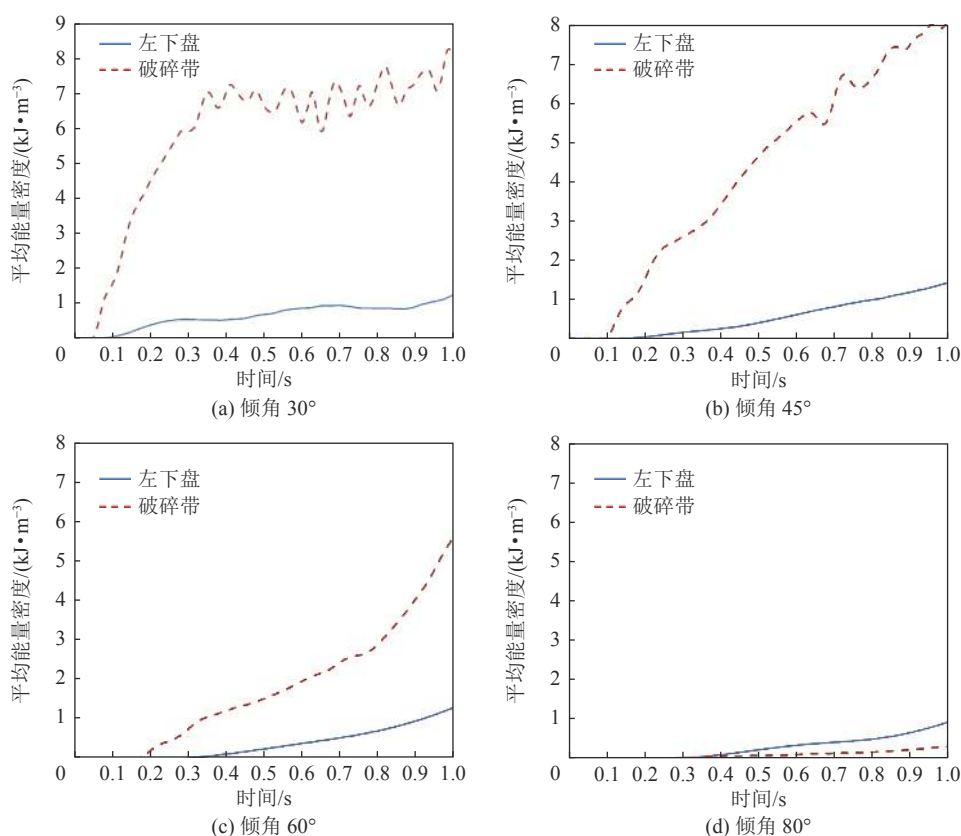


图9 断层倾角对能量阻隔影响

Fig.9 Influence of fault's dip angle on energy

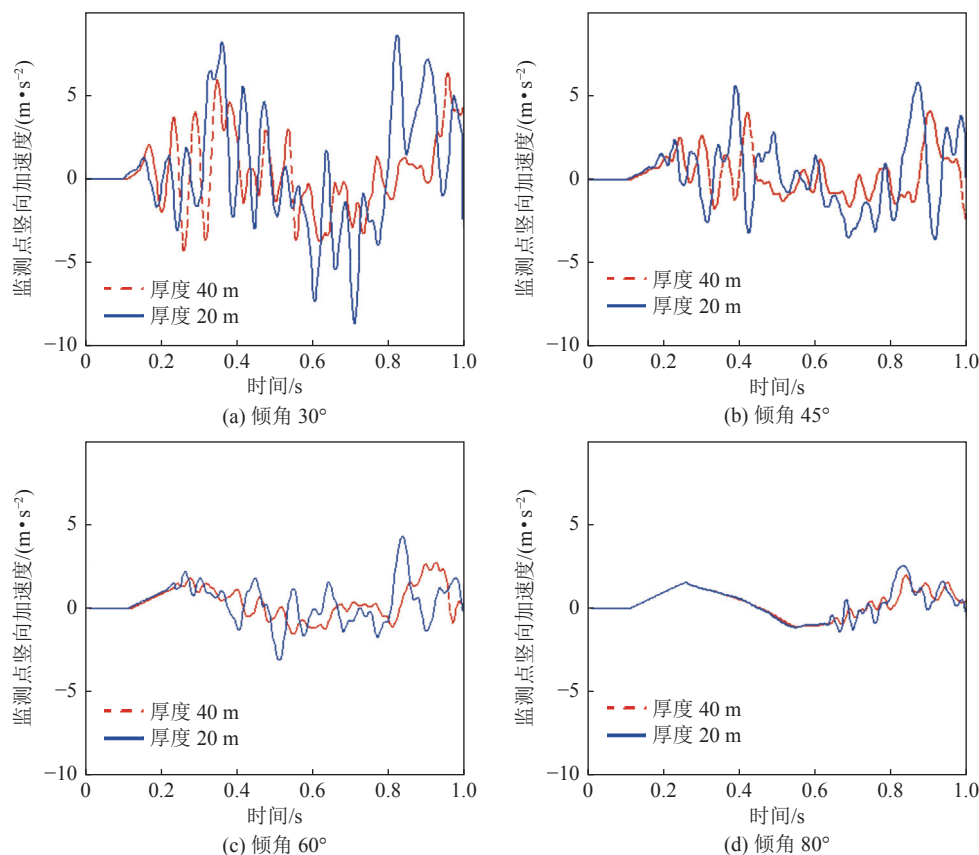


图 10 断层破碎带厚度对加速度阻隔性影响

Fig.10 Influence of fracture zone thickness on acceleration

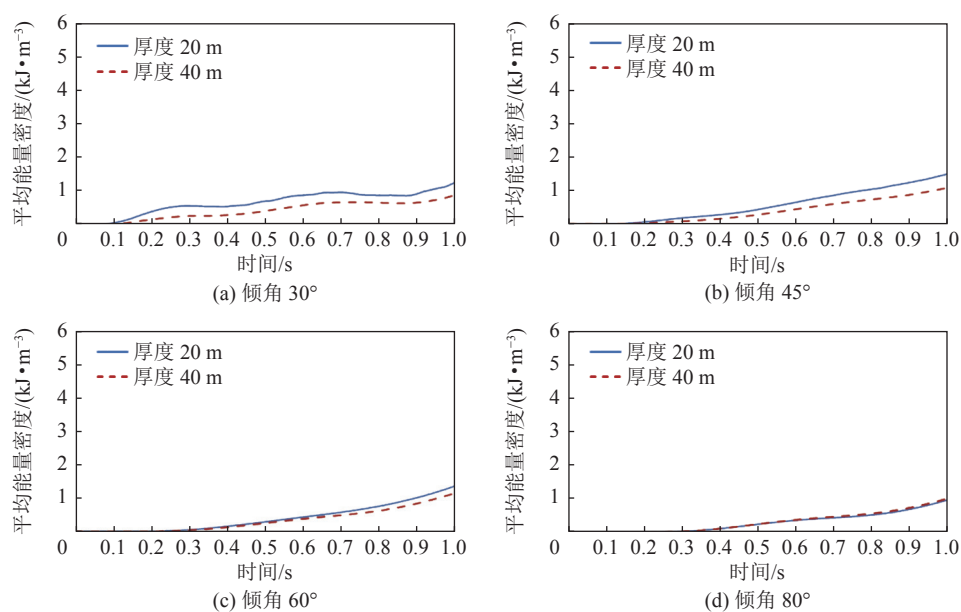


图 11 断层破碎带厚度对能量阻隔影响

Fig.11 Influence of fracture zone thickness on energy

向)。断层上盘沿着断层面滑动,根据滑动方向及滑动量,可分为倾断层(12a)、正-平移断层(12b)和正-旋转断层(12c)。

对于已经形成的正断层,在一定应力环境下,两盘的活动性人们一般继续沿用惯性思维即上盘继续

下降和上盘继续上升。事实上,断层的滑移,上盘与下盘滑动性是有条件的。对于在地表露头能够揭露的断层,既存在上盘下降的可能性,也有下盘上升的可能性。而对于未能断裂到地表的地下断层,在大面积采矿等扰动下,对断层两盘挤应力 σ_3 将进一步

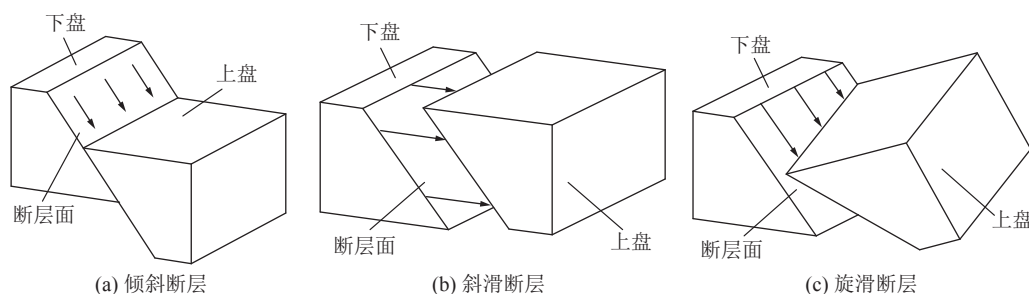


图12 正断层形态

Fig.12 Patterns of normal fault

减小,促使断层上盘沿着断层面下滑,将成为可能;而下盘是不动的,更不可能沿着重力作用相反方向“上滑”,最多可表述为因上盘下降滑移导致下盘相对于上盘下滑而言上为升。

这对于正断层两盘在开采扰动下“活化”行为的认知正确性,是断层活化致灾防控科学性的前提。长期以来普遍认为,开采诱发正断层活动导致的动力灾害程度在断层两盘均等,以同等的重要程度进行管控,这不符合实际。从“2·22”冲击地压灾害显现在断层两盘的差异性,便充分说明了这一点。因此,要强调正断层因上盘滑动致灾在两盘差异性:即在断层上盘所覆盖的工程区域其动力灾害危险性将高于下盘所覆盖工程区域。国家交通运输部于2020年3月11日起,在《公路隧道抗震设计规范》中明确规定隧道选址时要求“隧道平行于活动断裂布置时,宜布置在断裂带的下盘内”(详见4.2.8条第2款),这项设计规范条文设置观点,与本文一致。同时,还要强调,对于逆断层、平推断层等断层两盘动力灾害的特征,将有别于采动等引起正断层滑动致灾的情形。因此,对于地下各类断层致灾机制还很复杂,研究工作还很肤浅,还需要不断在实践中基础上进行修正,不可墨守成规。

5 结 论

1)通过分析各类分解弹性波的波场能量变化曲线,得到了当入射波接近于界面法线时,绝大部分能量因反射而被阻隔,断层面(带)的“隔震”效应明显。

2)通过数值模拟分析,断层倾角对断层面(带)的“隔震”作用影响较大,当断层倾角达到一定量值时,正断层滑移引起的震动波将无法透射断层面,断层具有“隔震”特性;同时,断层破碎带厚度对断层面(带)的“隔震”也有较大影响。

3)所分析的断层面(带)“隔震”力学机理,较好

解释了山东新巨龙能源有限责任公司发生“2·22”冲击地压事故沿着正断层两盘呈现出动力灾害程度差异性机制,为高角度正断层活动诱发冲击地压防治提供了新的认识。

4)不同类型地震波沿着不同类型断层面的反射、透射规律引起断层两盘动力显现差异性规律研究十分复杂,是未来亟待研究的方向。

参考文献(References):

- [1] 胡聿贤,孙平善,章在塘,等.场地条件对震害和地震动的影响[J].地震工程与工程振动,1980,(0):34-41.
HU Yuxian, SUN Pingshan, ZHANG Zaiyong, et al. Effect of soil layer construction on earthquake damage and ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1980, (0): 34-41.
- [2] ABRAHAMSON N A, SOMERVILLE P G. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the northridge Earthquake[J]. Bulletin of Seismological Society of America, 1996, 86(1B): S93-S99.
- [3] YU Yanxiang, GAO Mengtan. Effects of the hanging wall and footwall on peak acceleration during the Jiji (Chi-Chi), Taiwan Province, earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 14(6): 654-659.
- [4] 吴健,吕红山,刘爱文.汶川地震烈度分布与震源过程相关性的初步研究[J].震灾防御技术,2008,3(3):224-229.
WU Jian, LU Hongshan, LIU Aiwen. Preliminary study on correlation between seismic intensity and earthquake source process in wenchuan earthquake of sichuan[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(3): 224-229.
- [5] 黄润秋,李为乐.汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J].工程地质学报,2009,17(1):19-28.
HUANG Runqiu, LI Weile. Fault Effect Analysis of geo-hazard triggered by wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 19-28.
- [6] 谢俊举,温增平,高孟潭,等.2008年汶川地震近断层竖向与水平向地震动特征[J].地球物理学报,2010,53(8):1796-1805.
XIE JunJu, WEN ZengPing, GAO MengTan, et al. Characteristics of near-fault vertical and horizontal ground motion from the 2008 wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010,

- 53(8): 1796–1805.
- [7] HUDSON J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks[J]. *Geophysical Journal International*, 1981, 64(1): 133–150.
- [8] PYRAK-NOLTE L J, MYER L R, COOK N G W. Transmission of seismic wave across single natural fractures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(6): 8617–8638.
- [9] BOADU F K, LONG T L. Effects of fractures on seismic-wave velocity and attenuation[J]. *Geophysical Journal International*, 1996 127(1): 86–110.
- [10] BOADU F K. Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties: Analytical studies[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 1997, 37(1): 1–19.
- [11] 范留明, 李宁. 软弱夹层的透射模型及其隔震特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(14): 2456–2462.
FAN Liuming, LI Ning. Transmission model of weak intercalation and its vibration isolation properties[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2456–2462.
- [12] 石崇, 徐卫亚, 周家文, 等. 节理面透射模型及其隔振性能研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 729–734.
SHI Chong, XU Weiya, ZHOU Jiawen, *et al.* Transmission model of joint interface and its performance of vibration isolation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 729–734.
- [13] 任春, 罗奇峰. 断层破碎带对非发震断层场地地震动的影响[J]. *地震研究*, 2005, 28(2): 162–166.
REN Chun, LUO Qifeng. Effect of fault fracture zone on the ground motion of non-causative fault site[J]. *Journal of Seismological Research*, 2005, 28(2): 162–166.
- [14] LI J C, LI N N, CHAI S B, *et al.* Analytical Study of Ground Motion Caused by Seismic Wave Propagation Across Faulted Rock Masses[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2018, 42(1): 95–109.
- [15] BEN-ZION Y, AKI K. Seismic radiation from an SH line source in a laterally heterogeneous planar fault zone[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1990, 80(4): 971–994.
- [16] HARRIS R A, DAY S M Day. Effects of a Low-Velocity Zone on a Dynamic Rupture[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(5): 1267–1280.
- [17] IGEL H, BEN-ZION Y, LEARY P C. Simulation of SH- and P-SV-wave propagation in fault zones[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 128(3): 533–546.
- [18] KANG I B, MCMECHAN G A. Effects of viscoelasticity on seismic wave propagation in fault zones, near-surface sediments, and inclusions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1993, 83(3): 890–906.
- [19] 石玉成, 陈丙午. 非发震断层的地震效应问题[J]. *西北地震学报*, 1994, 16(1): 12–20.
SHI Yucheng, CHEN Bingwu. Effect of Non-causative fault on earthquake damages[J]. *Northwest Seismological Journal*, 1994, 16(1): 12–20.
- [20] 温瑞智, 周正华, 孙平善, 等. 断层场地地震动分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(1): 21–27.
WEN Ruizhi, ZHOU Zhenghua, SUN Pingshan, *et al.* Ground Motion Analysis for Near-fault Site[J]. *Journal of Earthquake and Engineering Vibration*, 2002, 22(1): 21–27.
- [21] IGEL H, JAHNKE G, BEN-ZION Y. Numerical Simulation of Fault Zone Guided Waves: Accuracy and 3-D Effects[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1990, 159(9): 2067–2083.
- [22] 李山有, 马强, 武东坡, 等. 断层场地地震反应特征研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, 23(5): 32–37.
LI Shanyou, MA Qiang, WU Dongpo, *et al.* Study on Characteristics of Seismic Responses of Fault Sites[J]. *Journal of Earthquake and Engineering Vibration*, 2003, 23(5): 32–37.
- [23] 刘必灯. 断陷盆地及断层破碎带场地地震动效应[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2011.
LIU Bideng. Site Effect of Strong Ground Motion for Dislocation Basin and Fault Fracture Zone[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011.
- [24] NAKAMURA T, TAKENAKA H. A numerical analysis of seismic waves for an anisotropic fault zone[J]. *Earth Planets and Space*, 2006, 58(5): 569–582.
- [25] 梁建文, 冯领香, 巴振宇. 局部断层场地对P波的散射影响研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 244–252.
LIANG Jianwen, FENG Lingxiang, BA Zhenning. Diffraction of plane P waves around a local fault[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 244–252.
- [26] 梁建文, 韩红霞. 断层破碎带对地震动的放大作用: (I)基本规律[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(5): 9–19.
LIANG Jianwen, HAN Hongxia. Amplification of Ground Motion Around Fault Fracture Zone(I): Basic Laws[J]. *Journal of Earthquake and Engineering Vibration*, 2013, 33(5): 9–19.
- [27] 梁建文, 韩红霞. 断层破碎带对地震动的影响: (II): 非线性放大作用[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(6): 16–25.
LIANG Jianwen, HAN Hongxia. Effect of Fault Fracture Zone on Ground Motion(II): Nonlinear Amplification[J]. *Journal of Earthquake and Engineering Vibration*, 2013, 33(6): 16–25.
- [28] 郭明珠, 曹鑫雨, 常议彬, 等. 断层破碎带对场地地震动的影响[J]. *工程抗震与加固改造*, 2016, 38(06): 129–135.
GUO Mingzhu, CAO Xinyu, CHANG Yibin, *et al.* Effect of Fault Fracture Zone on Ground Motion of Fault Site[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2016, 38(06): 129–135.
- [29] JONÁS D D B, MRINAL K S, MARY F W. Elastic wave propagation in fractured media using the discontinuous Galerkin method[J]. *Geophysics*, 2016, 81(4): 163–174.
- [30] VAMARAJU J, SEN M K, BASAB J D, *et al.* A Hybrid Galerkin Finite Element Method for Seismic Wave Propagation in Fractured Media[J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 221(1): 857–878.
- [31] 谢里夫, 吉尔达特. 勘探地震学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
SHERIF R E, GELDART L P. *Exploration Seismology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [32] 中国科学院地质研究所. 岩体工程地质力学问题[M]. 北京: 科学出版社, 1976.
Institute of geology, Chinese Academy of Sciences. *Engineering geomechanics of rock mass*[M]. Beijing: Science Press, 1976.