

王松, 朱守彪. 2022. 断层破裂速度对地震动及其地震灾害影响的有限单元法模拟. 地球物理学报, 65(2): 686-697, doi:10.6038/cjg2022P0094.
Wang S, Zhu S B. 2022. Finite element method simulations of the influences of fault rupture velocities on ground motions and seismic hazards. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(2): 686-697, doi:10.6038/cjg2022P0094.

断层破裂速度对地震动及其地震灾害影响的有限单元法模拟

王松, 朱守彪*

应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

摘要 断层破裂传播速度通常会影响到强地面运动加速度的空间分布及地震的灾害程度, 但究竟是如何影响的, 目前未见全面的定量分析. 为此, 本研究设断层破裂速度从小到大发生改变(从亚剪切波速度到超剪切破裂速度), 同时利用有限元方法计算在不同破裂传播速度的情况下, 破裂产生的地震动及强地面运动峰值加速度(PGA)的空间分布, 计算时保持所有情况下其断层上的最终位错相等, 即所有不同破裂情况下产生的地震矩震级保持不变, 都为 $M_w=7.0$. 计算结果显示: 总体上, 破裂传播的速度越快, PGA 的幅值越大并且高值区分布的范围也越广, 其地震灾害会越严重; 超剪切破裂相对于亚剪切破裂会加剧地震灾害. 但是, 当破裂速度正好等于介质的剪切波速度时, 断层面附近 PGA 峰值最大, 断层附近的地震灾害最为严重. 此外, 研究中还发现, 当破裂传播速度等于 $\sqrt{2}$ 倍剪切波速度时(该速度称为 Eshelby 速度), 不产生剪切马赫波; 这与超剪切破裂产生剪切马赫波的普遍现象不一致; 但此时 PGA 并没有大幅度减小, 其震害也不会有显著改变. 因此, 本研究对于深入认识地震震源过程、地震动效应以及灾害评估有着重要的科学意义及实用价值.

关键词 断层破裂速度变化; 强地面运动加速度; 超剪切破裂; Eshelby 速度; 有限单元法

doi:10.6038/cjg2022P0094

中图分类号 P315

收稿日期 2021-02-04, 2022-01-12 收修定稿

Finite element method simulations of the influences of fault rupture velocities on ground motions and seismic hazards

WANG Song, ZHU ShouBiao*

National Institute of Nature Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

Abstract The propagation velocity of fault rupture usually affects the spatial distribution of strong ground motions and the degree of earthquake disasters. However, there is no comprehensive study on how the rupture speeds affect seismic hazards. To this end, this study changed the rupture speeds of the fault propagation from small value to large magnitude (i. e., from subshear wave velocity to supershear rupture speed), and at the same time, the finite element method was used to calculate the rupture scenarios and the corresponding ground motions. The spatial distribution of the peak ground acceleration (PGA) is calculated with the final dislocations on the

基金项目 国家自然科学基金项目(41874060, 41574041), 国家重点研发项目(2017YFC1500104)以及中央级科研院所基本科研业务专项(ZDJ2020-15)共同资助.

第一作者简介 王松, 男, 1997 年生, 在读硕士研究生, 主要从事地球动力学研究. E-mail: ws729@foxmail.com

*** 通讯作者** 朱守彪, 男, 理学博士, 研究员, 博士生导师. 现主要从事地壳动力学、地震活动性及地震预报方法研究.
E-mail: zhushb@pku.edu.cn; zhushoubiao@gmail.com

fault kept the same in all cases, that is, the moment magnitude of the earthquakes generated under different rupture conditions remains unchanged, which is $M_w=7.0$. The calculation results show that, in general, the faster the rupture propagation speed, the larger the PGA is, and also wider the distribution of high-value areas. Accordingly, the more serious the earthquake disaster will be. Overall, the seismic hazard will be graver for the supershear rupture earthquake than that of subshear rupture event. However, when the rupture speed is exactly equal to the shear wave speed of the medium, the peak value of PGA near the fault is the largest, and the earthquake disaster is the most serious. In addition, this study also found that when the rupture propagation speed is equal to $\sqrt{2}$ times of the shear wave speed, which is called Eshelby velocity, no Mach wave appears. This is inconsistent with the general phenomenon of supershear rupture that generates Mach fronts. Therefore, this research is of important scientific significances and practical values for in-depth understanding of earthquake source process, ground motion effects and seismic hazard assessment.

Keywords Various velocities of fault rupture propagation; Strong ground motion acceleration; Supershear rupture; Eshelby speed; Finite element method

0 引言

地震学研究表明,天然地震断层的破裂传播速度不尽相同,大多数地震的破裂速度是介质剪切波速度的 0.8 倍(Heaton, 1990),但也有一些地震,其破裂速度超过了介质的剪切波速度,如:1979 年美国 Imperial Valley 地震($M_w 6.5$)(Archuleta, 1984; Spudich and Cranswick, 1984)、1999 年土耳其 Izmit 地震($M_w 7.6$)(Bouchon et al., 2001, 2002; Sekiguchi and Iwata, 2002)、1999 年土耳其 Düzce 地震($M_w 7.1$)(Bouchon et al., 2001; Birgöen et al., 2004; Bouin et al., 2004; Ozgun Konca et al., 2010)、2001 年中国昆仑山口西地震($M_w 7.8$)(Bouchon and Vallée, 2003; Antolik et al., 2004; Robinson et al., 2006; Vallée et al., 2008; Walker and Shearer, 2009)、2002 年美国阿拉斯加 Denali 地震($M_w 7.9$)(Dunham and Archuleta, 2005; Ellsworth et al., 2004; Asano et al. 2005; Walker and Shearer, 2009)、2010 年青海玉树地震(Wang and Mori, 2012; Yokota et al., 2012; 张丽芬等, 2014)以及 2013 年美国阿拉斯加 Craig 地震($M_w 7.5$)(Yue et al., 2013)、2018 年印度尼西亚巴鲁地震($M_w 7.5$)(Bao et al., 2019). 这类地震认为是超剪切破裂地震. 当发生超剪切地震破裂时,不同时刻所有破裂尖端产生的地震波同时到达马赫锥,并发生相长干涉,导致马赫波振幅显著增大,相应的地震动幅度也大大增加,从而加重地震灾害(Bernard and Baumont, 2005; Dunham and Bhat, 2008; Andrews,

2010; Cruz-Atienza and Olsen, 2010; 胡进军和谢礼立, 2011; Vallée and Dunham, 2012; Yue et al., 2013; 徐建宽, 2014; 朱守彪等, 2017; 朱守彪和袁杰, 2018). 此外,近期的研究还表明,地震破裂的速度没有禁区,可以从亚瑞雷波(sub-Rayleigh wave)速度一直连续变化到超剪切波速度(如: Bizzarri and Das, 2012; Liu et al., 2014; Weng and Ampuero, 2020). 而之前一度认为断层的破裂速度有一个禁区(forbidden zone),即破裂速度不可能介于瑞雷波与剪切波速度之间(Andrews, 1976; Burridge et al., 1979; Broberg, 1999; Bizzarri and Das, 2012).

然而,断层破裂速度与地震动及地震灾害之间究竟有什么样的关系? 这个问题至今未见前人进行过系统的分析和定量研究. 为此,本文设定一个矩震级为 7.0 的系列地震,并设这些地震断层的破裂速度由小到大变化(即从亚剪切破裂变换到超剪切破裂);研究在地震震级都相同的情况下,考察只是由于断层的破裂速度发生改变,不同地震造成的地震动及强地面运动加速度(PGA)幅值的变化及其在空间的分布,由此进一步分析矩震级相同的地震由于破裂速度不同造成的灾害程度的差异. 无疑,本研究可以加深理解断层破裂速度对于地震灾害的影响.

1 有限元模型

本文试图模拟在地震震级不变的情况下,断层

的破裂速度从小到大变化. 由于在数值模拟中, 断层的破裂速度是不容易控制的, 因此研究中参考前人的方法采用运动学模型 (如: Aagaard and Heaton, 2004; Bernard and Baumont, 2005), 即设断层上的质点产生位错脉冲, 激发地震波. 尽管位错传播的速度不同, 但断层长度及位错量大小的累积是相同的, 从而保证不同的破裂传播速度情况下, 其矩震级都是相同的. 实际计算中, 采用有限单元方法进行定量模拟分析.

1.1 基本模型参数

为抓住主要矛盾, 同时也节省计算资源, 研究中将实际地震的三维空间结构简化为二维模型, 将复杂的断层几何简化为一条直线. 图 1 展示有限元模型、断层几何以及边界条件. 图中有限元模型的几何尺度为 $110 \text{ km} \times 110 \text{ km}$ 的正方形, 图中直线表示断层, 其长度为 40 km . 破裂起始位置处于断层的中央, 图中用红色五角星表示. 在断层破裂过程的动力学模拟中, 很难随意控制断层自发破裂的传播速度, 因此为实现断层破裂速度的任意控制, 研究中采用运动学的方法. 即在断层面上的每个节点上加载位错脉冲, 通过控制位错脉冲前行的速度来控制断层破裂的速度. 同时, 为了尽量减少地震波在边界上的反射所造成的数据污染, 模型边界上采用了吸收边界 (见图 1 中绿色边界部分) (朱守彪等, 2017; 袁杰和朱守彪, 2017).

本文实际计算利用有限元商业软件 (ABAQUS) 来实现, 其中模拟正常地震时用 ABAQUS/Explicit (显式动力学算法) 进行计算, 模拟产生慢地震时 (即断层破裂的总时间为 10 天), 选用 ABAQUS/Implicit (隐式动力学算法) 进行计算. 另外, 为了尽量减小有限元网格大小变化引起的计算误差, 文中采用大小均匀的正四边形单元 ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$). 整个模型的有限元网格节点数为 1217000, 单元数为 1214400.

为了简化计算, 本文所有模型中全部采用均匀各向同性的线弹性介质, 具体材料参数选定为, 介质密度 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, P 波速度 $V_p = 5196 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, S 波速度 $V_s = 3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 有限元模型中, 所有破裂 (包括亚剪切破裂及超剪切) 的破裂总时间长度为 30 s ; 显式动力学中计算的时间步长为 10^{-3} s ; 但模拟慢地震的总时间为 10 天 (864000 s), 计算时间步长为 1000 s .

1.2 震源参数

为了模拟断层破裂时产生的地震动过程, 震源参数的选择非常重要. 参照前人的方法, 本文的震源

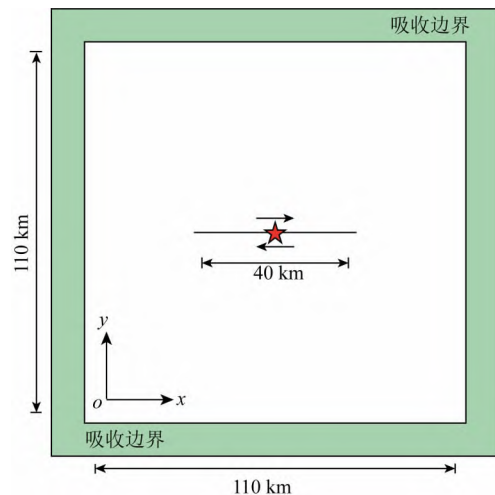


图 1 有限元模型的几何以及断层位置

中间黑色直线表示断层, 断层长度为 40 km , 断层为右旋走滑断层, 红色五角星为破裂起始位置; 模型四周绿色区域为吸收边界.

Fig. 1 The geometry and fault location of the finite element model

The black line in the middle is the fault with the length of 40 km . The fault is a right-handed strike-slip fault, and the red star stands for the rupture starting position, while the green area around the model represents the absorbing boundary.

时间函数采用 Schmedes 等 (2010) 中的运动源模型 (见公式 (1)), 其变化趋势类似于 Yoffe 的震源时间函数 (Yoffe, 1951).

$$\dot{s}(t) = A \operatorname{Re} \left[\frac{\sqrt{T_0 + T_r - T_p - t}}{\sqrt{t - T_0}} \right] * H(T_p - t) \sin\left(\pi \frac{t}{T_p}\right), \quad (1)$$

式中 $\dot{s}(t)$ 为滑移速率, A 是一个常数, 由 $\int_{-\infty}^{\infty} \dot{s}(t) dt = 1$ 来决定; $H(t)$ 为海维赛德 (Heaviside) 函数, Re 表示对括号内部的量取实数; T_0 为破裂开始时间, T_p 为峰值时间, T_r 为上升时间. 参照前人的模型结果 (Tinti et al., 2005; Liu et al., 2006), 本文选取 $T_p = 0.2 \text{ s}$, $T_r = 1.0 \text{ s}$, $T_0 = 0.5 \text{ s}$, 滑移速率的变化如图 2a 所示, 这样滑移时间函数见图 2b.

文中设定断层上每个单元节点破裂时, 有如图 2b 所示的滑移时间函数. 实际计算时, 按照破裂速度大小, 将滑移时间函数离散化后一一施加到所有的断层节点上 (不同位置的节点起始点不同), 这样就可以形成地震破裂过程. 此外, 图 2b 显示最终位移为 1 m , 这样位错量即为 2 m . 对于一般的地震, 假定断层深度为 15 km , 其地震矩为 $2.916 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 因而矩震级是 $M_w 7.0$. 研究中, 对于所有的破裂模型, 尽管断层的破裂速度不同, 但其矩震

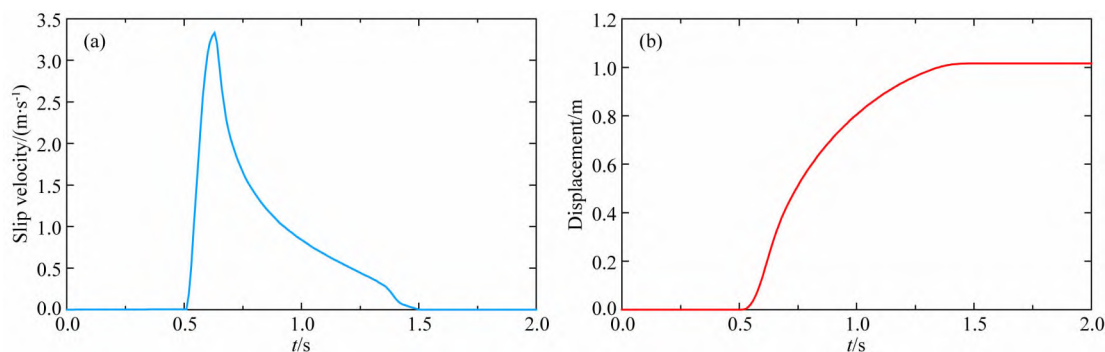


图2 震源时间函数变化曲线图

(a) 表示断层上节点滑移速率随着时间的变化;(b) 表示断层面每个节点上其位移随着时间的变化曲线。

Fig. 2 Curves of source function with time

(a) Slip rates change with time at each node on the fault; (b) Displacements vary with time at each node on the fault plane.

级都是相同的(包括慢地震). 下文中,通过改变断层的破裂速度,考察不同模型造成的地震动差异,定量给出 PGA 和 PGV 在空间的展布,进而研究地震灾害分布情况。

2 模拟结果

通过对实际地震的研究,发现不同的地震其断层的破裂速度是不同的. 下面利用有限元方法,研究在不同的断层破裂传播速度的情况下,地震动过程及 PGA 在空间的展布及其地震灾害分布情况。

2.1 断层破裂过程

为研究不同的断层破裂速度对地震动的影响,本文以介质的剪切波速度(V_s)为分界线,分别设定亚剪切破裂和超剪切破裂两种情况来进行数值模拟. 计算中首先将亚剪切破裂速度分别设定为 0.6、0.7、0.8 及 0.9 倍的剪切波速度. 图 3 表示在这种情况下,模拟给出的不同时间的加速度空间分布等值线图快照. 图中从左至右为不同的破裂速度($0.6V_s$ 、 $0.7V_s$ 、 $0.8V_s$ 及 $0.9V_s$),从上到下分别为不同的时刻(从第 1 s 到第 8 s)的快照. 图中清晰地显示,随着时间的推移,不同破裂速度的破裂都是由断层中心向两侧传播;在同一时刻,破裂速度越大的破裂,其地震动加速度也越大,即震害会越严重(朱守彪和袁杰, 2018)。

当破裂速度大于剪切波速度,即产生超剪切破裂时,不同的断层破裂速度、在不同时刻的加速度快照如图 4 所示. 图中显示,当破裂为超剪切破裂时,都产生了马赫波,这与前人的结果是一致的(Bernard and Baumont, 2005; Andrews, 2010; Vallée and Dunham, 2012; Yue et al., 2013; 朱守彪等, 2017). 同时,还

可以看到,随着破裂传播速度的增大,马赫角逐渐减小(Bernard and Baumont, 2005)。

对比图 3 与图 4 可以清楚地看到,当发生亚剪切破裂时,地震波主要集中在断层附近及破裂前端,加速度的高值区范围较小;但是,当产生超剪切破裂时,由于马赫波的形成,加速度的图像发生了很大的改变,加速度的高值区的空间范围明显增大,这时的地震灾害会大大增加。

2.2 PGA 和 PGV 空间分布

由于地震灾害主要是由于地震产生的力的作用导致的,而力的来源是地震动加速度. 所以,为更加清楚地显示不同的断层破裂速度造成的地震灾害,下面分别给出在不同的破裂速度时,强地面运动峰值加速度(PGA)和峰值速度(PGV)在空间的分布。

图 5 是在不同破裂速度模型中的 PGA 空间分布. 图中显示,当破裂速度为亚剪切破裂时,破裂速度越大,PGA 的峰值越高,并且分布范围也越大,即地震灾害随着破裂速度的增大而加剧;同时图中还可以看到,超剪切破裂的 PGA 总体上比亚剪切破裂的 PGA 峰值高、展布范围大,即超剪切破裂造成的地震灾害比亚剪切破裂要严重(Bernard and Baumont, 2005; Dunham and Bhat, 2008; Andrews, 2010). 图 6 中的 PGV 空间分布也有类似的规律。

值得注意的是,我们可以从 PGA 空间分布上看到,超剪切破裂明显降低了断层附近最强烈的峰值速度,但在一些距离较远的地方增加了速度量值,这一结果与前人模拟给出的结果具有一致性(Bernard and Baumont, 2005; Andrews, 2010)。

在亚剪切波速情况下,破裂发生时的定向波束集中在断层投影周围的一个狭窄方位范围内. 在断层附近峰值速度本来很强烈,但是由于破裂波束是

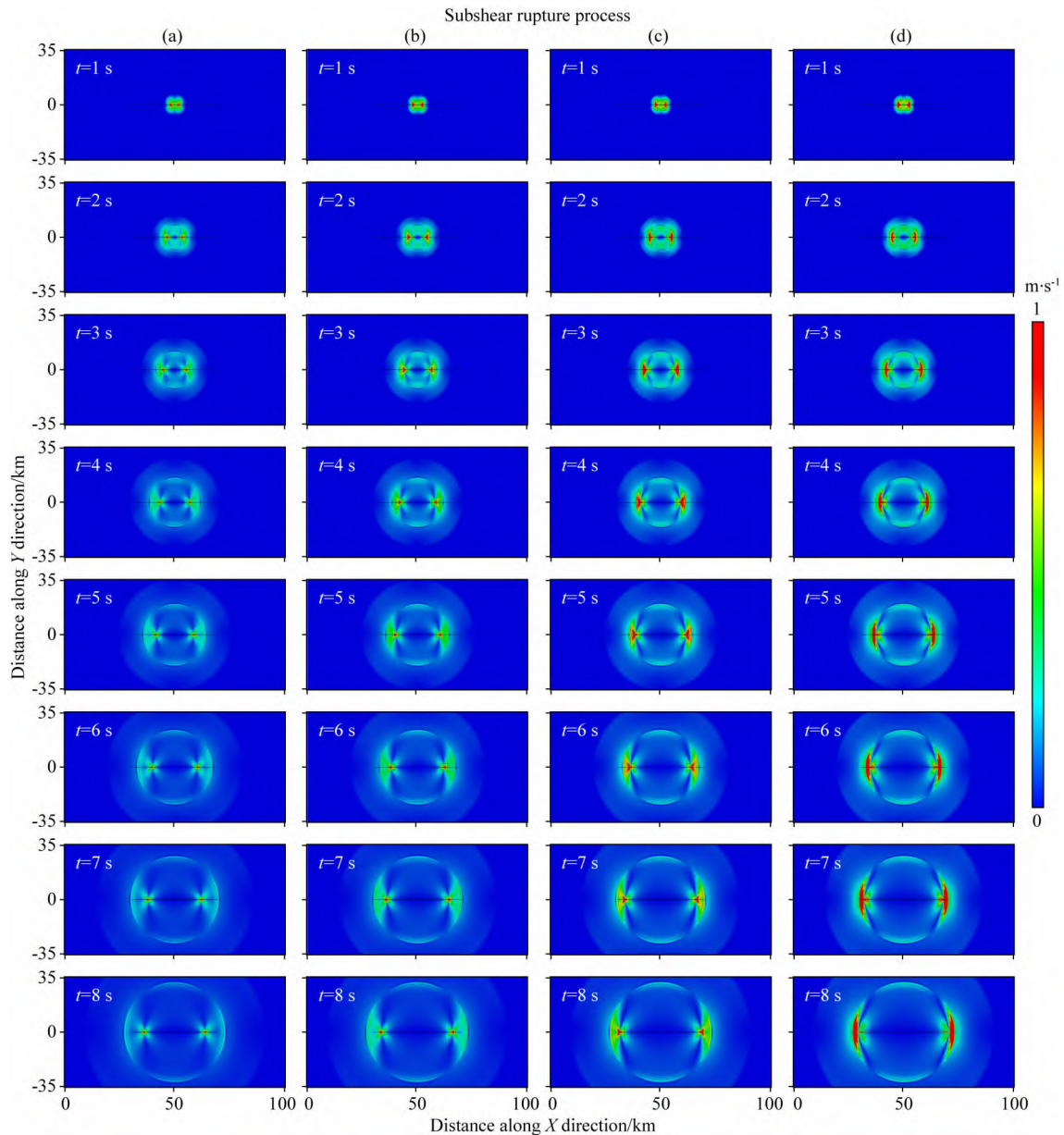


图3 当断层破裂速度都为亚剪切破裂时,不同破裂速度模型的速度等值线云图在不同时刻的快照
(a) $V_r = 0.6V_s$ (第一列图); (b) $V_r = 0.7V_s$ (第二列图); (c) $V_r = 0.8V_s$ (第三列图); (d) $V_r = 0.9V_s$ (第四列图)。

Fig. 3 Snapshots of velocity cloud diagrams for different rupture velocity models

when the fault rupture velocities are all at sub-shear ruptures

(a) $V_r = 0.6V_s$ (the first column); (b) $V_r = 0.7V_s$ (the second column);

(c) $V_r = 0.8V_s$ (the third column); (d) $V_r = 0.9V_s$ (the fourth column).

发散的,故而衰减很快,振幅剧烈部分集中于断层附近。

在超剪切情况下,马赫波形成一束平行射线。马赫波束也可以被认为是一种方向性效应,因为它取决于震动源的相干性。马赫波的振幅是恒定的,直到在更大的距离,由于衍射和散射而不断衰减(Bernard and Baumont, 2005)。

此外,图中还展示了一个十分显著的特征,当断

层的破裂速度等于介质的剪切波速度时,PGA在断层附近的幅值特别大;可以想象这样的地震,其灾害将是特别严重。这种情况在实际天然地震是否产生,是值得今后深入研究的问题。

值得注意的是,超剪切破裂的地震(如破裂速度为 $1.3V_s$ 、 $1.5V_s$ 及 $1.7V_s$),地震动在垂直于断层方向的衰减慢,并且随着速度的增大,PGA高值区在空间的分布范围也逐渐增大,即震害也会加剧。

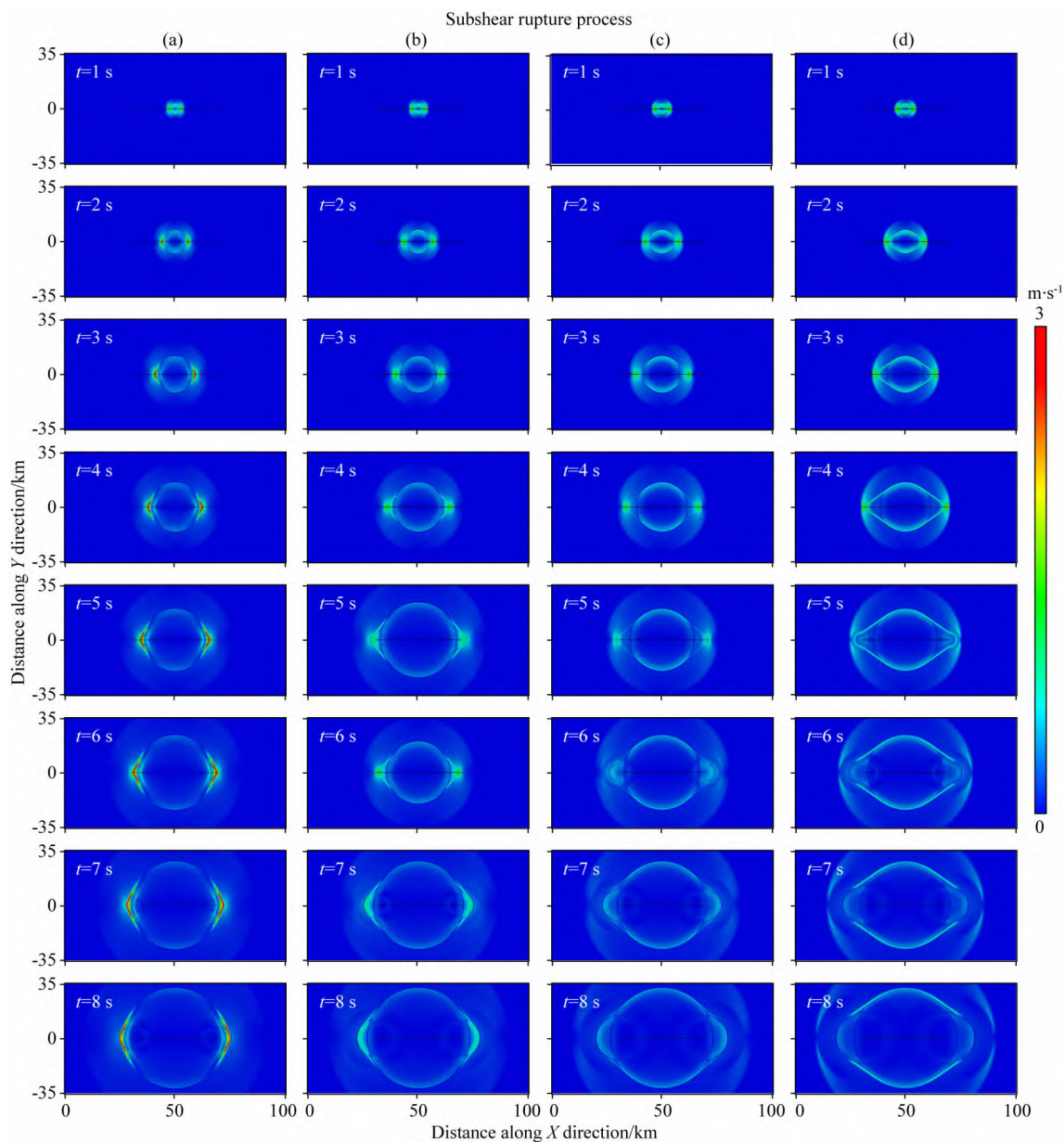


图4 当断层破裂速度都为超剪切破裂时,不同破裂速度模型的速度云图快照

(a) $V_r=1.3V_s$ (第一列图); (b) $V_r=1.5V_s$ (第二列图); (c) $V_r=1.7V_s$ (第三列图); (d) $V_r=1.9V_s$ (第四列图)。

Fig. 4 Snapshots of velocity cloud diagrams for different rupture velocity models

when the fault rupture velocities are all at supershear ruptures

(a) $V_r=1.3V_s$ (the first column); (b) $V_r=1.5V_s$ (the second column);

(c) $V_r=1.7V_s$ (the third column); (d) $V_r=1.9V_s$ (the fourth column)。

3 讨论

为研究断层不同破裂速度对地震灾害的影响,我们还研究了2个极端破裂速度情况的模型,即一个速度非常小,另一个速度特别大的模型。首先,模拟破裂速度非常缓慢的破裂模型(这种地震通常称为慢地震或慢滑移事件),模拟中所有其他的模型参数都与前文的模型相同。在这种情况下,破裂产生的

矩震级仍为 $M_w=7.0$ 不变,即断层上的最终位错大小不变,但破裂的时间设定为10天,此时的断层破裂速度为 $0.046\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。通过与上述同样的模拟计算发现,慢地震中PGA值非常微小,几乎处处为0(见图7a)。这时除了断层两侧的位错可能会对建筑物等带来损坏外,地震波几乎不产生任何破坏性影响。

另一个极端模型就是断层破裂速度为无穷大的情况,这时断层上所有节点同时发生破裂。同样,保

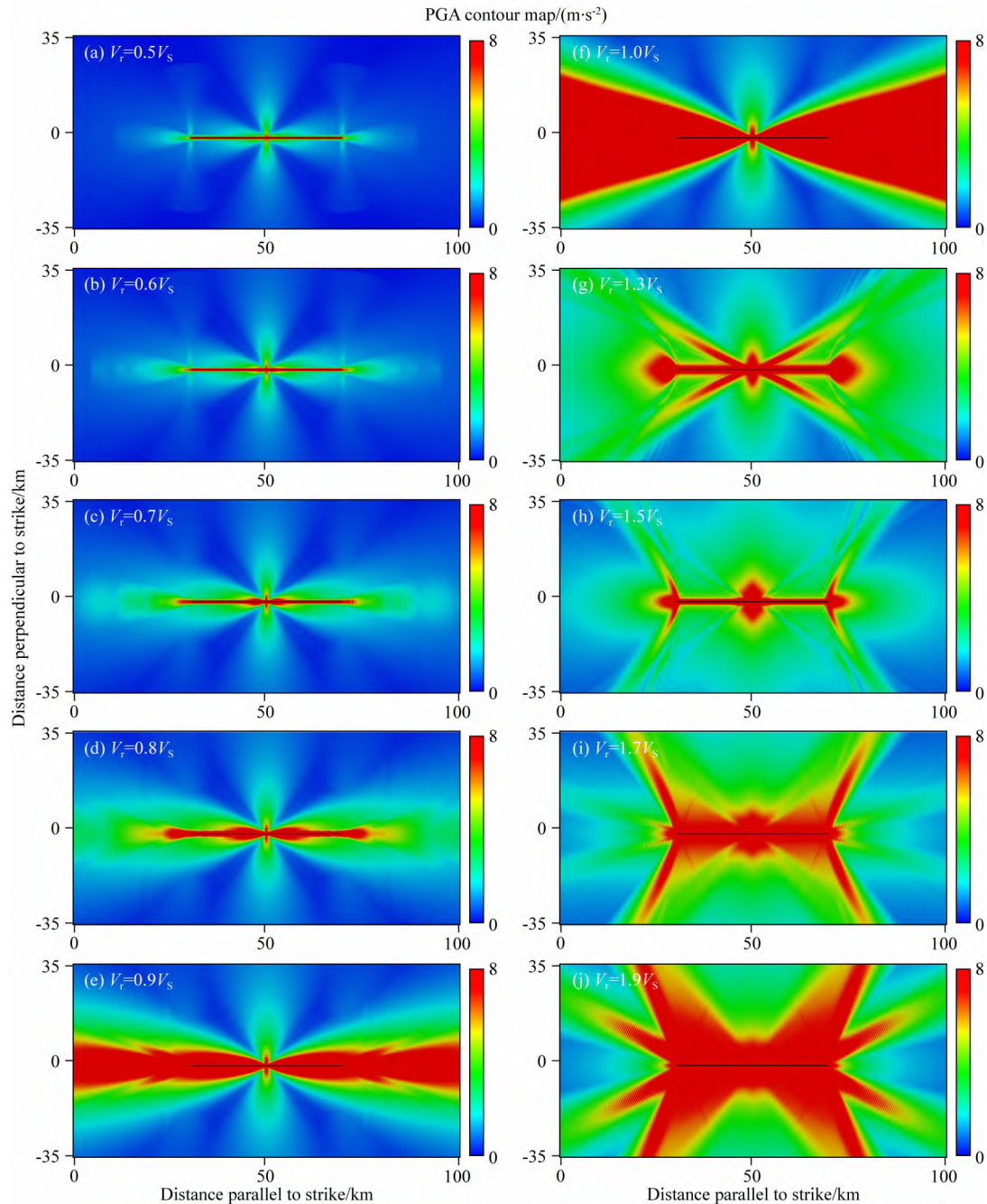


图5 不同破裂速度时的 PGA 分布

图(a—e)是亚剪切破裂时的 PGA 分布;图(f)是破裂速度为剪切波速时 PGA 分布,图(g—j)在发生超剪切破裂时的 PGA 分布.

Fig. 5 PGA distributions at different rupture speeds

Figures (a—e) denote the PGA distributions when subshear ruptures occur; Figure (f) is the PGA distribution when the rupture velocity is at the shear wave velocity, and figures (g—j) are the PGA distributions when the super-shear ruptures occur.

持矩震级为 $M_w = 7.0$ 不变,断层上最终位错与前面的模型保持一致.通过相同的模拟计算得到,此时 PGA 比较大,且主要分布在断层的两侧(见图 7b).通过对照比较发现,我们的模拟结果与前人的完全一致(Bernard and Baumont, 2005).由此可见,这时断层两侧地震灾害较大,震灾严重地区的空间分布范围也比较广泛.

另外,模拟中还发现了一个奇特的现象,当断层的破裂传播速度正好等于 $\sqrt{2}V_s$ 时(该速度称为 Eshelby 速度)(Eshelby, 1949),这时破裂过程不产生剪切马赫波(见图 8b).图 8 为当破裂速度分别为 $1.3V_s$ 、 $\sqrt{2}V_s$ 以及 $1.5V_s$ 时不同时刻的质点振动速度云图.图中显示,当破裂速度为 $1.3V_s$ 和 $1.5V_s$ 时,剪切马赫锥明显.但当破裂速度等于 $\sqrt{2}V_s$ 时,所

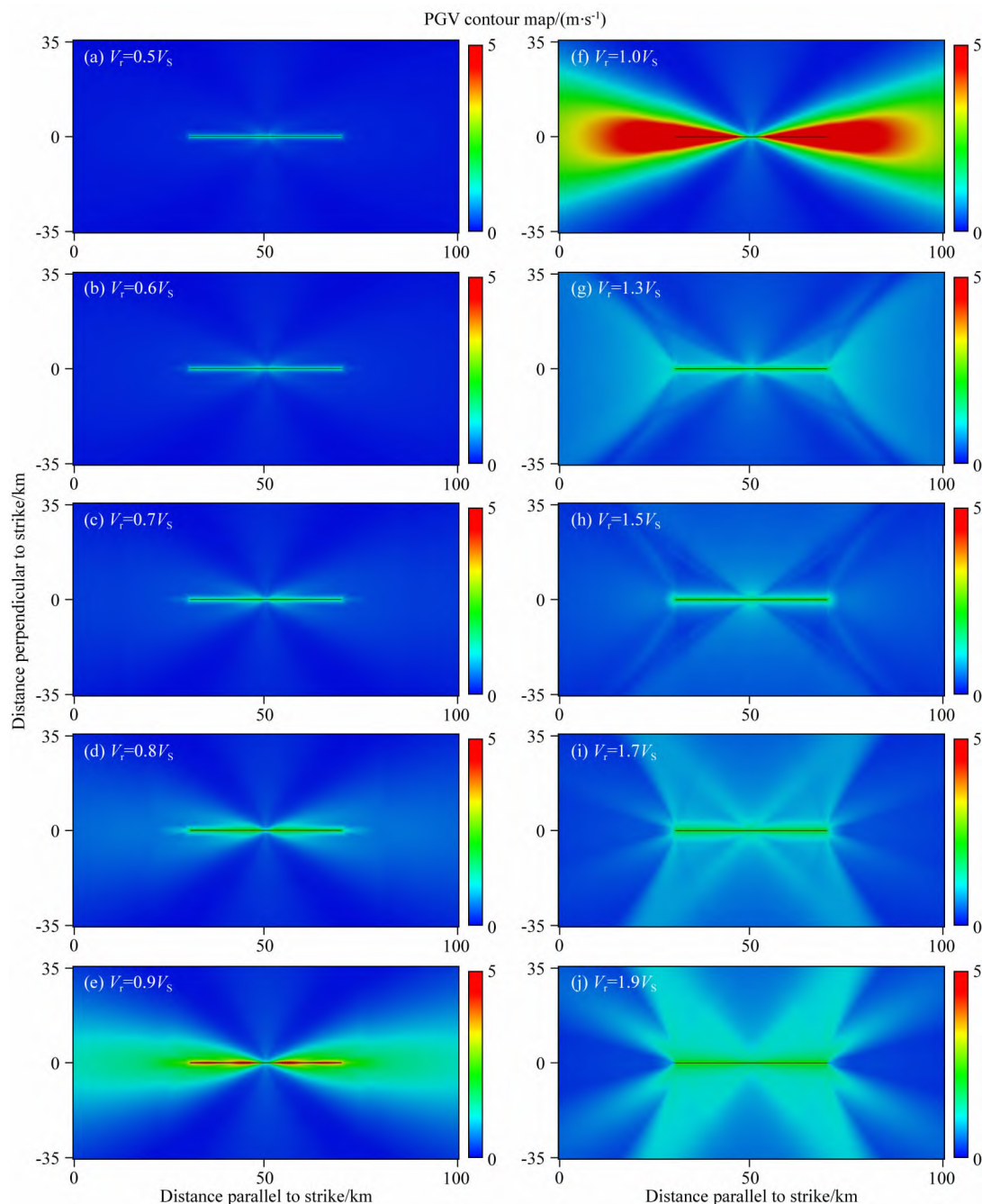


图6 不同破裂速度时的 PGV 分布

图(a—e)是亚剪切破裂时的 PGV 分布;图(f)是破裂速度为剪切波速时 PGV 分布;图(g—j)在发生超剪切破裂时的 PGV 分布.

Fig. 6 PGV distribution at different rupture speeds

Figures (a—e) denote PGV distribution when subshear ruptures occur; Figure (f) is the PGV distribution when the rupture velocity is at the shear wave velocity, and figures (g—j) are the PGV distributions when the super-shear ruptures occur.

有时刻的剪切马赫波均消失. 这一结果与前人的结果也具有—致性(Dunham and Archuleta, 2005). 图9表示当破裂速度分别为 $1.3V_s$ 、 $\sqrt{2}V_s$ 和 $1.5V_s$ 时 PGA 的空间分布图. 图中显示, 尽管当破裂速度为 Eshelby 速度时(即 $\sqrt{2}V_s$)剪切马赫波消失, 但 PGA 的空间分布并不是太大, 说明地震灾害没有明显的减小. 实际上, 前人的研究结果表明, 1999 年土

耳其 Izmit 地震($M_w 7.5$)以及 2013 年鄂霍次克海地震的强余震($M_w 6.7$), 其断层破裂速度近似为 Eshelby 速度(Bouchon et al., 2001; Zhan et al., 2014; Weng and Ampuero, 2020). 但是, 关于产生 Eshelby 速度破裂地震的动力学条件及孕震环境等还值得进一步深入研究.

关于剪切马赫波消失的现象, 可以从 Weertman

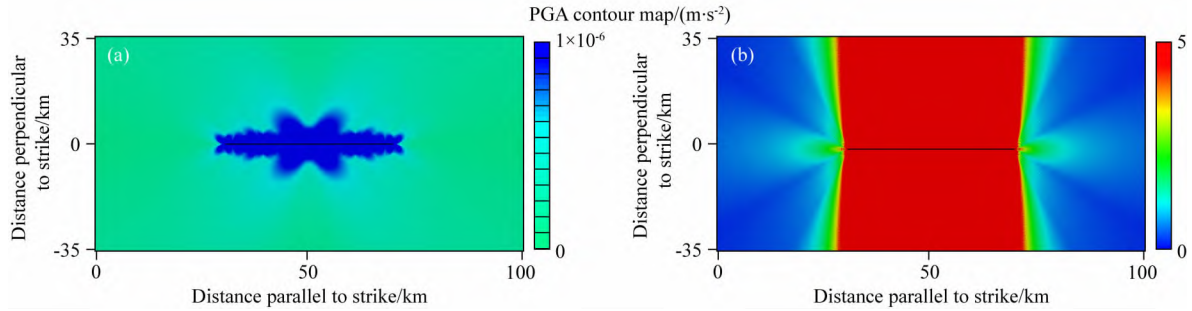


图 7 2 个极端模型中 PGA 空间分布图

(a) 慢地震; (b) 破裂速度为无穷大的模型.

Fig. 7 PGA distributions in two end members

(a) Slow event; (b) Model with infinity rupture velocity.

(1996, 2004)推导的断层破裂速度与应力场之间的关系中得到解释.

根据 Weertman(1996, 2004)的理论推导,在均匀各向同性介质中,若断层的破裂速度是 V , u 是 x 方向的位移(平行于接触面), v 是 y 方向位移(垂直于接触面),下标 S 的参数与横波有关,下标 L 的参数与纵波有关,则关于纵波和横波的水平 and 垂直方向的位移可分别表示如下:

$$u_s = \frac{b_s}{\pi} \arctan \frac{\beta_s y}{x}, \quad (2)$$

$$v_s = \frac{b_s}{\pi \beta_s} \ln \sqrt{x^2 + \beta_s^2 y^2}, \quad (3)$$

$$u_L = \frac{b_L}{\pi} \arctan \frac{\beta_L y}{x}, \quad (4)$$

$$v_L = \frac{b_L \beta_L}{\pi} \ln \sqrt{x^2 + \beta_L^2 y^2}, \quad (5)$$

式中, $\beta_s^2 = 1 - V^2/C_s^2$, $\beta_L^2 = 1 - V^2/C_L^2$, S 波速度 $C_s = \sqrt{G/\rho}$, P 波速度 $C_L = C_s \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$, b_s 是只与横波有关的位错, b_L 是只与纵波有关的位错, G 是剪切模量, ρ 是密度, ν 是泊松比.

这样,关于横波和纵波的剪切应力可以用以下公式表达.

$$\{\sigma_{xy}\}_L = \frac{2b_L G \beta_L}{\pi} \left(\frac{x}{x^2 + \beta_L^2 y^2} \right), \quad (6)$$

$$\{\sigma_{xy}\}_S = \frac{2b_s G \beta_s^2}{\pi \beta_s} \left(\frac{x}{x^2 + \beta_s^2 y^2} \right). \quad (7)$$

当破裂速度 $V = \sqrt{2}C_s$ (Eshelby 速度), 此时 $\beta_{2s} = \sqrt{1 - V^2/2C_s^2} = 0$, 这样 $(\sigma_{xy})_S = 0$; 所以,关于 S 波的剪切应力为 0. 因此,当破裂速度为 Eshelby 速度时,剪切马赫波不存在. 文中的数值模拟结果进一步验证了 Weertman (1996, 2004) 推导的结论.

4 结论

本文利用有限单元方法模拟了震级为 $M_w 7.0$ 时,在不同的断层破裂传播速度情况下,相应的地震动及其 PGA 在空间的分布特征,主要结论如下.

地震动及其强地面运动加速度空间分布受断层破裂速度的影响很大. 总体来说,断层破裂速度越快,PGA 峰值越大、展布的范围也越大,因而造成的地震灾害也会越严重;特别是当产生超剪切破裂时,地震动及其造成的地震灾害远远大于亚剪切破裂的同震级地震.

但是,当断层的破裂速度正好等于介质的剪切波速度时,近断层处的 PGA 幅度特别大,甚至超过超剪切破裂的情况. 然而,当破裂速度为 Eshelby 速度时,剪切马赫波消失,但 PGA 并没有大幅度减小,其震害也没有显著减轻. 另外,若破裂速度十分缓慢,PGA 的幅值几乎为 0,所以慢地震地震动几乎不会对建筑物造成影响.

致谢 两位审稿专家提出了诸多宝贵意见和建议,在此表示感谢.

References

- Aagaard B T, Heaton T H. 2004. Near-source ground motions from simulations of sustained intersonic and supersonic fault ruptures. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6): 2064-2078, doi: 10.1785/0120030249.
- Andrews D J. 1976. Rupture velocity of plane strain shear cracks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 81(32): 5679-5687.
- Andrews D J. 2010. Ground motion hazard from supershear rupture. *Tectonophysics*, 493(3-4): 216-221, doi: 10.1016/j.tecto.2010.02.003.

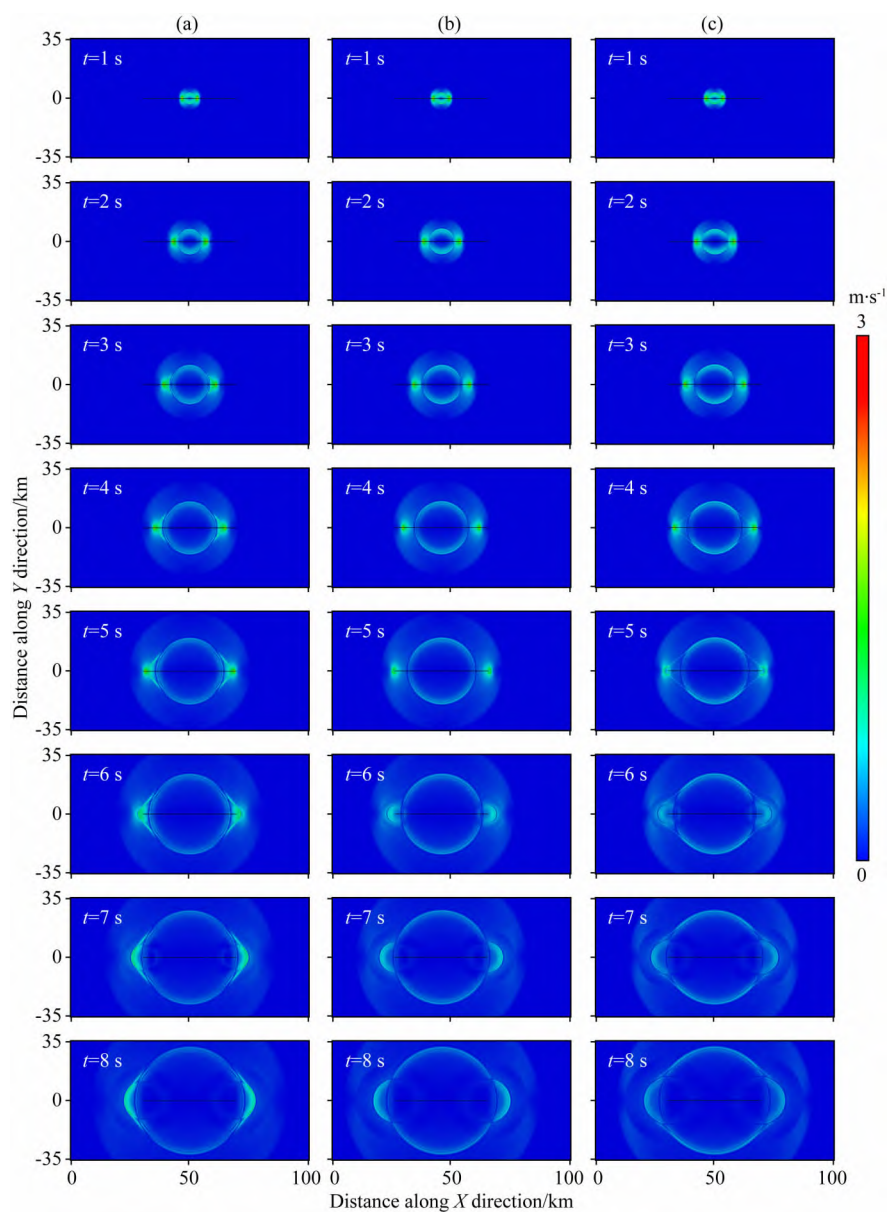


图 8 当破裂速度分别为 $1.3V_s$ 、 $\sqrt{2}V_s$ 以及 $1.5V_s$ 时不同时刻的加速度快照

(a) 当破裂速度为 $1.3V_s$ 时, 出现了马赫波; (b) 当破裂速度为 $\sqrt{2}V_s$ 时, 未见剪切马赫波; (c) 当破裂速度为 $1.5V_s$ 时, 再次出现了马赫波。

Fig. 8 Snapshots of particle accelerations at different moments when the rupture velocity is $1.3V_s$, $\sqrt{2}V_s$, and $1.5V_s$, respectively

(a) When the rupture velocity is $1.3V_s$, Mach waves appear; (b) When the rupture velocity is $\sqrt{2}V_s$, the Mach waves are not observed; (c) When the rupture velocity is $1.5V_s$, Mach waves appear again.

Antolik M, Abercrombie R E, Ekström G. 2004. The 14 November 2001 Kokoxili (Kunlunshan), Tibet, Earthquake: Rupture transfer through a large extensional step-over. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4): 1173-1194, doi: 10.1785/012003180.

Archuleta R J. 1984. A faulting model for the 1979 Imperial Valley earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89 (B6): 4559-4585, doi: 10.1029/JB089iB06p04559.

Asano K, Iwata T, Irikura K. 2005. Estimation of source rupture process and strong ground motion simulation of the 2002 Denali, Alaska, earthquake. *Bulletin of the Seismological Society*

of America, 95(5): 1701-1715, doi: 10.1785/0120040154.

Bao H, Ampuero J P, Meng L S, et al. 2019. Early and persistent supershear rupture of the 2018 magnitude 7.5 Palu earthquake. *Nature Geoscience*, 12(3): 200-205, doi: 10.1038/s41561-018-0297-z.

Bernard P, Baumont D. 2005. Shear Mach wave characterization for kinematic fault rupture models with constant supershear rupture velocity. *Geophysical Journal International*, 162(2): 431-447, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02611.x.

Birgören G, Sekiguchi H, Irikura K. 2004. Rupture model of the

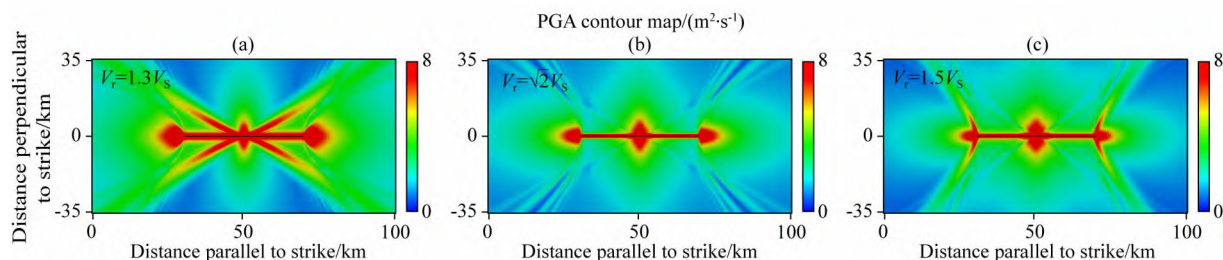


图9 破裂速度分别为 $1.3V_s$, $\sqrt{2}V_s$ 和 $1.5V_s$ 时 PGA 分布图

(a) 破裂速度为 $1.3V_s$; (b) 破裂速度为 $\sqrt{2}V_s$; (c) 破裂速度为 $1.5V_s$.

Fig. 9 PGA distributions when the rupture velocity is $1.3V_s$, V_s and $1.5V_s$, respectively

1999 Düzce, Turkey, earthquake deduced from high and low frequency strong motion data. *Geophysical Research Letters*, 31 (5): 8-11, doi: 10.1029/2003gl019194.

Bizzarri A, Das S. 2012. Mechanics of 3-D shear cracks between Rayleigh and shear wave rupture speeds. *Earth and Planetary Science Letters*, 357-358, 397-404, doi: 10.1016/j.epsl.2012.09.053.

Bouchon M, Bouin M P, Karabulut H, et al. 2001. How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 28(14): 2723-2726, doi: 10.1029/2001GL013112.

Bouchon M, Toksöz M N, Karabulut H, et al. 2002. Space and time evolution of rupture and faulting during the 1999 İzmit (Turkey) earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1): 256-266, doi: 10.1785/0120000845.

Bouchon M, Vallée M. 2003. Observation of long supershear rupture during the magnitude 8.1 Kunlunshan earthquake. *Science*, 301(5634): 824-826, doi: 10.1126/science.1086832.

Bouin M P, Bouchon M, Karabulut H, et al. 2004. Rupture process of the 1999 November 12 Düzce (Turkey) earthquake deduced from strong motion and Global Positioning System measurements. *Geophysical Journal International*, 159(1): 207-211, doi: 10.1111/j.1365-246X.2004.02367.x.

Broberg K B. 1999. Cracks and Fracture. New York: Academic Press.

Burridge R, Conn G, Freund L B. 1979. The stability of a rapid mode II shear crack with finite cohesive traction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84, 2210-2222, doi: 10.1029/JB084iB05p02210.

Cruz-Atienza V M, Olsen K B. 2010. Supershear Mach-waves expose the fault breakdown slip. *Tectonophysics*, 493(3-4): 285-296, doi: 10.1016/j.tecto.2010.05.012.

Dunham E M, Archuleta R J. 2004. Evidence for a supershear transient during the 2002 Denali fault earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(6 Suppl. B): S256-S268, doi: 10.1785/0120040616.

Dunham E M, Archuleta R J. 2005. Near-source ground motion from steady state dynamic rupture pulses. *Geophysical Research Letters*, 32(3): L03302, doi: 10.1029/2004GL021793.

Dunham E M, Bhat H S. 2008. Attenuation of radiated ground

motion and stresses from three-dimensional supershear ruptures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8): B08319, doi: 10.1029/2007JB005182.

Ellsworth W L, Celebi M, Evans J R, et al. 2004. Near-field ground motion of the 2002 Denali fault, Alaska, earthquake recorded at pump station 10. *Earthquake Spectra*, 20(3): 597-615, doi: 10.1193/1.1778172.

Eshelby J D. 1949. Uniformly moving dislocations. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 62(5): 307-314, doi: 10.1088/0370-1298/62/5/307.

Heaton T H. 1990. Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64(1): 1-20, doi: 10.1016/0031-9201(90)90002-F.

Hu J J, Xie L L. 2011. Review of the state-of-the-art researches on earthquake super-shear rupture. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 26(1): 39-47.

Liu C, Bizzarri A, Das S. 2014. Progression of spontaneous in-plane shear faults from sub-rayleigh to compressional wave rupture speeds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119 (11): 8331-8345.

Liu P, Archuleta R J, Hartzell S H. 2006. Prediction of broadband ground-motion time histories: Hybrid low/high-frequency method with correlated random source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2118-2130, doi: 10.1785/0120060036.

Ozgun Konca A, Leprince S, Avouac J P, et al. 2010. Rupture process of the 1999 $M_w 7.1$ Düzce earthquake from joint analysis of SPOT, GPS, InSAR, strong-motion, and teleseismic data: A supershear rupture with variable rupture velocity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(1): 267-288, doi: 10.1785/0120090072.

Robinson D P, Brough C, Das S. 2006. The $M_w 7.8$, 2001 Kunlunshan earthquake: Extreme rupture speed variability and effect of fault geometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111 (8): 1-10, doi: 10.1029/2005JB004137.

Schmedes J, Archuleta R J, Lavallée D. 2010. Correlation of earthquake source parameters inferred from dynamic rupture simulations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(3): B03304, doi: 10.1029/2009JB006689.

- Sekiguchi H, Iwata T. 2002. Rupture process of the 1999 Kocaeli, Turkey, earthquake estimated from strong-motion waveforms. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(1): 300-311, doi: 10.1785/0120000811.
- Spudich P, Cranswick E. 1984. Direct observation of rupture propagation during the 1979 Imperial Valley earthquake using a short baseline accelerometer array. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(6): 2083-2114.
- Tinti E, Fukuyama E, Piatanesi A, et al. 2005. A kinematic source-time function compatible with earthquake dynamics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(4): 1211-1223, doi: 10.1785/0120040177.
- Vallée M, Dunham E M. 2012. Observation of far-field Mach waves generated by the 2001 Kokoxili supershear earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39(5): L05311, doi: 10.1029/2011GL050725.
- Vallée M, Landès M, Shapiro N M, et al. 2008. The 14 November 2001 Kokoxili (Tibet) earthquake: High-frequency seismic radiation originating from the transitions between sub-Rayleigh and supershear rupture velocity regimes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(7): 1-14, doi: 10.1029/2007JB005520.
- Walker K T, Shearer P M. 2009. Illuminating the near-sonic rupture velocities of the intracontinental Kokoxili $M_w7.8$ and Denali fault $M_w7.9$ strike-slip earthquakes with global P wave back projection imaging. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(2): 1-21, doi: 10.1029/2008JB005738.
- Wang D, Mori J. 2012. The 2010 Qinghai, China, Earthquake: A moderate earthquake with supershear rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1): 301-308, doi: 10.1785/0120110034.
- Weertman J. 1996. Dislocation Based Fracture Mechanics. Singapore: World Scientific, doi: 10.1142/3062.
- Weertman J. 2004. Quasidislocation stoneley wave and eshelby dislocation scholte wave. *Physical Review Letters*, 93(20): 205505, doi: 10.1103/PhysRevLett.93.205505.
- Weng H, Ampuero J P. 2020. Continuum of earthquake rupture speeds enabled by oblique slip. *Nature Geoscience*, 13(12): 817-821, doi: 10.1038/s41561-020-00654-4.
- Xu J K. 2014. Study on supershear rupture and ground motion with free surface [Ph. D. thesis] (in Chinese). Hefei: University of Science and Technology of China.
- Yoffe E H. 1951. LXXV. The moving griffith crack. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 42(330): 739-750, doi: 10.1080/14786445108561302.
- Yokota Y, Kawazoe Y, Yun S, et al. 2012. Joint inversion of teleseismic and InSAR datasets for the rupture process of the 2010 Yushu, China, earthquake. *Earth, Planets and Space*, 64(11): 1047-1051, doi: 10.5047/eps.2012.04.008.
- Yuan J, Zhu S B. 2017. Numerical simulation of seismic supershear rupture process facilitated by a fault stepover. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(1): 212-224, doi: 10.6038/cjg20170118.
- Yue H, Lay T, Freymueller J T, et al. 2013. Supershear rupture of the 5 January 2013 Craig, Alaska ($M_w7.5$) earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(11): 5903-5919, doi: 10.1002/2013JB010594.
- Zhan Z W, Helmberger D V, Kanamori H, et al. 2014. Supershear rupture in a $M_w6.7$ aftershock of the 2013 sea of Okhotsk earthquake. *Science* 345(6193): 204-207, doi: 10.1126/science.1252717.
- Zhang L F, Fatchurochman I, Yao Y S, et al. 2014. Super-shear rupture process inversion of the 2010 Yushu earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(1): 52-61.
- Zhu S B, Yuan J, Miao M. 2017. Dynamic mechanisms for supershear rupture processes of the Yushu earthquake ($M_s=7.1$). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 3832-3843, doi: 10.6038/cjg20171013.
- Zhu S B, Yuan J. 2018. Physical mechanism for extremely serious seismic damage in the Beichuan area caused by the great 2008 Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(5): 1863-1873, doi: 10.6038/cjg2018M0111.

附中文参考文献

- 胡进军, 谢礼立. 2011. 地震超剪切破裂研究现状. *地球科学进展*, 26(1): 39-47.
- 徐建宽. 2014. 自由地表作用下的超剪切破裂及强地面运动研究 [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学.
- 袁杰, 朱守彪. 2017. 断层阶区对产生超剪切地震破裂的促进作用. *地球物理学报*, 60(1): 212-224, doi: 10.6038/cjg20170118.
- 张丽芬, Fatchurochman I, 姚运生等. 2014. 2010年玉树超剪切破裂地震破裂过程反演. *地震地质*, 36(1): 52-61.
- 朱守彪, 袁杰, 缪森. 2017. 青海玉树地震($M_s=7.1$)产生超剪切破裂过程的动力学机制研究. *地球物理学报*, 60(10): 3832-3843, doi: 10.6038/cjg20171013.
- 朱守彪, 袁杰. 2018. 2008年汶川大地震中北川地区极重震害的物理机制研究. *地球物理学报*, 61(5): 1863-1873, doi: 10.6038/cjg2018M0111.

(本文编辑 何燕)