•复杂艰险山区重大工程与环境•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500323

本刊网刊

基于探地雷达的岩体裂隙动态扩展过程识别方法

陈　军[1],张　波[2],庄兴岳[1],宋智书[3],郑　俊[3*]

(1.浙江省地矿勘察院有限公司,浙江 杭州 310063;2.杭州市地铁集团有限责任公司,浙江 杭州 310020;3.浙江大学 建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

摘　要:岩体裂隙的动态扩展行为是影响岩体工程稳定性的关键因素,其渐进式演化可能导致岩体力学性能的质变,并诱发滑坡、崩塌等重大灾害。然而,现有监测技术(如钻孔摄像、CT扫描和声发射)在动态追踪、空间分辨率和工程适用性方面存在显著局限性,难以满足复杂裂隙网络实时监测的需求。为此,提出一种基于探地雷达(GPR)的岩体裂隙动态扩展过程识别方法,结合数值模拟与物理试验,系统揭示了正交裂隙系统的扩展机制与GPR信号响应规律。首先,利用GPRMax软件建立了包含正交裂隙系统的数值模型,模拟水平裂隙自左至右、竖向裂隙自下而上及自上而下3种扩展方向下的电磁波场动态演化特征,并通过类岩体物理试验(采用混凝土预制裂隙模型)验证了数值模拟的可靠性。研究发现:水平扩展过程中,GPR信号呈现3阶段特征(独立扩展、协同耦合及贯通复合),基于相位突变点与干涉极值点的反演模型可精准定位裂隙端点的空间坐标,且定位误差小于5%;竖向扩展过程受遮蔽效应(自下而上扩展时上覆裂隙的强反射干扰)或信号衰减(自上而下扩展时裂隙下端反射能量微弱)影响,仅能识别两阶段(独立扩展期与裂隙贯通期)特征,其垂向轨迹反演精度受限。针对上述瓶颈,提出时序化多方位联合探测技术,通过多角度入射波场数据的融合分析,突破单一探测视角的遮蔽效应,提升裂隙三维动态演化特征的解析能力。此外,进一步探讨了人工智能驱动的高效反演、多尺度监测技术融合等未来研究方向,为工程实践中岩体稳定性评估与灾害预警提供了理论支撑和技术路径。

关键词:探地雷达;岩体裂隙;动态扩展;模型试验;数值模拟;参数反演

中图分类号:TU45;P631.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0107-13

岩体工程与国家重大工程建设(土木、水利、交通)、国家战略安全(军事防护、地下储气库建设、页岩气开采)和环境保护(CO_2封存、核废料地下存储)等密切相关[1–2]。岩体中的裂隙作为地质体中的天然弱面,其存在与扩展行为深刻影响着岩体工程的稳定性。从微观结构到宏观工程,裂隙网络既是岩体力学性能的“薄弱环节”,又是渗流通道的“隐形动脉”,其双重属性决定了其在工程灾害链中的核心地位[3–4]。绝大多数岩体工程事故与裂隙网络失稳直接相关,而裂隙的动态扩展往往是灾害触发的临界点。以三峡库区为例,岸坡岩体中普遍发育的“X”形共轭裂隙系统在库水位周期性涨落作用下,主裂隙向次生裂隙逐年延伸,这种渐进式扩展导致岩体完整性下降,最终可能演变为数万立方米级的滑坡体[5]。具体而言,当一条裂隙扩展至与原有结构面相交时,岩体系统将发生非线性失稳。两组正交裂隙在贯通瞬间,岩体抗剪强度骤降,渗透率则跃升[6–7],这种力学–渗流参数的阶跃式劣化将直接导致岩体失稳。这印证了裂隙扩展监测的重要性:其一,裂隙尺寸的渐进式增长可能引发岩体性能的质变;其二,扩展过程中多裂隙的相互作用会显著加速灾变进程。通过裂隙扩展动态监测,实时捕捉裂隙贯通前兆特征,可预警岩体抗剪强度骤降与渗透率跃升等灾变临界状态,为滑坡防控与地下工程安全运维提供关键判据。

国内外学者围绕岩体裂隙监测开展了许多探索。钻孔摄像技术方面:Zoback等[8]采用钻孔电视成像(BHTV)技术对深部地热储层裂隙进行监测,通过分析孔壁图像中的裂隙开度变化,量化了地应力扰动下的裂

收稿日期:2025–05–01　　**修回日期:**2025–06–10　　**网络出版日期:**2025–06–17

基金项目:国家自然科学基金项目(42422704)

作者简介:陈　军(1983—),男,高级工程师.研究方向:岩土工程.E-mail:253202137@qq.com

* **通信作者:**郑　俊,教授,E-mail:zhengjun12@zju.edu.cn

隙动态响应；邹先坚等[9]通过钻孔图像分析及分形维数表征，揭示了岩石结构面三维形貌特征，提出基于环形轮廓线处理和自仿射分形参数的优势抗滑方向判定方法；刘灿灿等[10]构建了钻孔成像裂隙数据集，通过卷积神经网络与优化霍夫变换算法，将钻孔成像裂隙识别率提升至90.20%。CT扫描技术方面：Renard等[11]结合同步辐射CT与数字体积相关法（DVC），量化了碳酸盐岩在单轴压缩下微裂隙的应变场演化，揭示了裂隙分叉的临界应变阈值为0.3%；周辉等[12]集成CT扫描技术与三维逆向重构技术，制作高保真大理岩结构面试样，开展了直剪试验与声发射监测试验；许度等[13]提出基于三维CT扫描技术的隧洞变形与岩体结构面非接触原位一体化测试技术，建立了基于三维CT扫描信息的岩体结构面定量表征方法；毛彦军等[14]采用CT扫描技术与数值模拟结合，有效模拟注水煤岩的裂隙渗流扩展行为。声发射技术方面：Lockner[15]通过声发射（AE）定位技术研究花岗岩剪切裂隙扩展，发现声发射事件累积数与裂隙面积增长呈线性相关，奠定了AE定量反演裂隙尺寸的理论基础；Wang[16]基于多尺度一维卷积神经网络（1DCNN）与双向长短期记忆网络（BLSTM）的融合模型，实现了岩石断裂AE信号的高精度分类与特征提取；陈云娟等[17]利用RFPA数值模拟揭示了水力耦合作用下裂隙岩体破裂扩展及声发射能量损伤规律。然而，上述监测技术均存在一定缺陷（表1）。钻孔摄像虽能获取较高精度的裂隙形态，但其探测半径局限在钻孔周围，难以追踪跨孔裂隙的连续扩展；CT扫描虽可捕捉到小尺度的裂隙扩展，但仅适用于实验室尺度，对工程中典型岩体裂隙（Ⅳ级结构面）的识别能力不足；声发射技术虽能捕捉裂隙萌生的微震动信号，但对扩展速率缓慢的裂隙定位误差较大，且无法区分新旧裂隙的几何特征。这种“看得清则测不全，测得全则辨不明”的技术困境，使得工程界亟需一种兼具非侵入性、动态追踪与定量解析能力的监测手段。探地雷达（GPR）的物理特性为此提供了突破口。例如，对于800 MHz天线，波长约为13.0 cm，其分辨率约为波长的一半，即6.5 cm，非常适合对岩体中Ⅳ级结构面的动态扩展进行监测。

表1 不同裂隙监测手段对比

Tab. 1 Comparison of different fracture monitoring methods

技术手段	分辨率	探测深度/m	适用场景	主要局限
钻孔摄像	0.1 mm	<10	钻孔壁面	破坏性、成本高
CT扫描	0.01 mm	<0.3	实验室样品	尺度受限、难以原位
GPR（本文研究）	3.5 cm	2～5	原位边坡	反演标准尚不明确

针对探地雷达的岩体裂隙检测研究，已有成果主要集中在静态裂隙识别领域。例如：Toshioka等[18]研究了GPR在绘制边坡岩体内部裂隙分布和连续性方面的适用性，证实了含水裂缝对电磁波的反射最强；Tzanis[19]发明了一种滤波器，帮助区分小裂缝和大裂缝的反射，解析裂缝密度；Arosio[20]探讨了利用探地雷达在频域估计岩体裂缝厚度和充填物的可能性，结果表明探地雷达是一种有效的无损检测手段；秦臻等[21]通过数值模拟研究了岩体内部垂直裂隙的宽度、长度、倾角等发生变化时，雷达回波剖面中裂隙对应的时距曲线形态和振幅特征的变化规律；Song等[22]发现不同形式的一对裂隙的GPR响应模式，并提出反演一对裂隙参数的理论方法。然而，当前GPR应用多聚焦于静态裂隙识别，对裂隙扩展过程中的实时信号演化规律缺乏系统研究，尤其对多裂隙交互扩展的雷达响应机理尚未明确，对裂隙延伸轨迹的定量反演方法也鲜有研究。

正交型裂隙网络在地质构造中非常普遍，尤其是在经历多期构造应力场的脆性岩体中。第一期应力场形成一组优势裂隙，后续不同方向的应力场则可能形成与之近正交的另一组裂隙。这种正交结构是许多岩体裂隙系统中的基本形态之一，对岩体的力学行为和水力特性具有基础性的控制作用。研究正交裂隙系统的扩展规律，有助于理解复杂裂隙网络演化的初始阶段和基础机制，并为分析更不规则的裂隙网络提供参照基准。

因此，本文采用GPRMax电磁波数值模拟软件，系统研究一对正交裂隙动态扩展过程的GPR图像响应特征。首先，通过类岩体物理试验，验证GPRMax模拟岩体裂隙雷达响应的可靠性；然后，针对水平自左至右、竖向自下而上与自上而下3种扩展方向，模拟一对正交裂隙系统的动态扩展过程，揭示其GPR信号的阶段性演化规律；同时，研究动态扩展过程中裂隙参数反演的可能性，提出裂隙空间坐标的反演模型并验证其精度；最后，针对不同扩展方向的正交裂隙系统的监测总结实际工程应用方案。

1 理论基础

探地雷达（GPR）利用电磁波的反射原理，由地表向下发射高频电磁波，当电磁波经过存在介电常数差异的界面时，部分被反射回地表，并由布置在地表的接收天线接收电磁波，通过对反射回来的电磁波进行处理分析，进而识别地下异常[23]。GPR发射高频电磁波并接收反射信号，其分辨率（约$\lambda/2$，λ为波长）与频率直接相关。影响探地雷达应用效果的主要物理参数为

相对介电常数ε_r(决定电磁波的传播速度)和电导率σ(影响探测深度)。对于岩体裂隙,电磁波在裂隙–基质界面处因介电常数差异产生反射与绕射。裂隙动态扩展过程中,其几何形态变化会改变电磁波的传播路径。以水平裂隙为例,探地雷达识别裂隙的原理如图1所示。

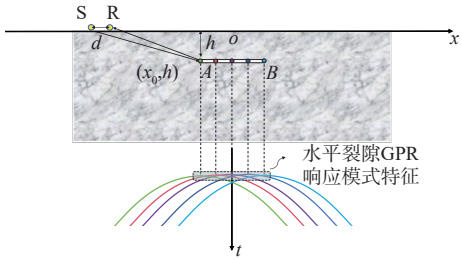


图1　探地雷达识别水平裂隙原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of horizontal fractures identified by ground penetrating radar

图1中:假设埋深为h的水平裂隙AB宽度非常小,可以视作由若干个点水平排列组成的线段;S为发射天线,R为接收天线,d为发射天线与接收天线的间距;以裂隙的中点正上方地面处的位置为坐标原点o,探地雷达在地面上沿裂隙的方向移动,以该方向为x轴,电磁波双程走时t为纵坐标,建立x–t坐标系;设水平裂隙上任意一点P的坐标为(x_0,h),当探地雷达的发射天线位于任意一点$(x,0)$处时,电磁波由发射天线发出,遇到点P后,由于介电常数的差异,电磁波将返回给接收天线。电磁波的双程走时t由式(1)计算:

$$t=t_{SA}+t_{RA}=\frac{1}{v}\sqrt{(x-x_0)^2+h^2}+\frac{1}{v}\sqrt{(x+d-x_0)^2+h^2} \tag{1}$$

式中,t_{SA}表示电磁波由发射天线S到裂隙左端点A的用时,t_{RA}表示电磁波由左端点A到接收天线R的用时,v表示电磁波在岩石中的传播速度。当d远小于待测模型水平方向长度x时,$d\approx0$,此时式(1)简化为:

$$t=\frac{2\sqrt{(x-x_0)^2+h^2}}{v} \tag{2}$$

对式(2)两端取平方并化简可得:

$$\frac{v^2t^2}{2h^2}-\frac{(x-x_0)^2}{h^2}=1 \tag{3}$$

可以看出,水平裂隙上任意一点(x_0,h)产生的雷达图谱为一条以$(x_0,0)$为端点的双曲线。由于水平裂隙可以看作是若干个点水平排列组成的集合,因此,其产生的图像理论上是若干条双曲线水平排列组成的组合图像,抛物线顶点构成一个水平段,整个图案类似一个倒扣的碗形。

探地雷达通过电磁波在裂隙–基质界面处的反射与绕射实现岩体裂隙识别。裂隙内介质(如空气,$\varepsilon_r=1$)与围岩(如花岗岩,$\varepsilon_r=8$)的介电常数差异会导致电磁波反射信号,其雷达图像呈现典型特征模式。以水平裂隙为例,回波图像形成碗状双曲线特征,通过分析双程走时、相位突变等参数,可反演裂隙的埋深、几何位置及扩展方向。而对于动态扩展过程,高频电磁波的高分辨率(如800 MHz天线理论上分辨率为6.5 cm)能捕捉裂隙的微小几何变化,结合时序化信号分析,理论上可实现裂隙扩展轨迹的追踪。因此,GPR的物理机制介电差异、波场调制与高频时域敏感性共同支撑了其在裂隙识别与动态扩展监测中的理论可行性。

2　数值方法及其验证

2.1　数值方法

本文利用GPRMax进行正演模拟。该开源仿真软件是由英国爱丁堡大学的Antonis Giannopoulos教授于1996年开发[24–25]。该软件基于Maxwell方程与时域有限差分(FDTD)算法,通过离散化介质电磁参数(ε_r、σ)模拟波场演化。GPRMax 3.0使得用户能够模拟探地雷达对各种介质的响应,并已有效地应用于地下异常的正演建模,包括地下管道[26]、土洞[27]、路面病害[28]、充水洞穴[29]、孤立岩石[30]等。然而,该软件能否有效模拟岩体裂隙的雷达响应,相关文献记载较少。因此,本文通过模型试验验证其在模拟裂隙响应方面的可靠性。

具体正演模拟方法如下:首先,通过代码构建裂隙岩体的几何模型,包括两个包含一对平行裂隙的模型、两个包含一对正交裂隙的模型和两个包含一对“V”形裂隙的模型。选取的岩石基质假定为均匀的花岗岩,整个正演模型为0.80 m×0.60 m×0.01 m的长方体,上层为空气层,下层为岩体。岩体由岩石和裂隙两部分组成,裂隙尺寸设定为0.20 m×0.02 m。为确保数值模拟精度,采用边长为0.01 m的正方形单元,网格尺寸设定($\Delta x=\Delta y=0.01$ m)严格地遵循FDTD方法的稳定性条件(Courant–Friedrichs–Lewy准则),即满足:CFL数(一个时间步内波的传播距离与网格尺寸之比)$C=v\Delta t/\Delta x\le1/\sqrt{2}$,其中,$v\approx1.1\times10^8$ m/s,时间步长$\Delta t=4.0\times10^{-11}$ s,计算得$C\approx0.440$(满足$C<0.707$)。将模型离散为80×60个均匀网格。使用主频频率为800 MHz的雷克子波从岩体上界面触发,经过裂隙界面发生反射,并由接收天线接收。通过对试验数据的反演计算,得到了介质的电磁参数,计算公式如式(4)所示:

$$\varepsilon_r=\left(\frac{c}{v'}\right)^2 \tag{4}$$

式中：c 为电磁波在真空里的传播速度；v' 为电磁波在岩石里实测的传播速度，实验室测量确为 0.106 m/ns。计算可得岩石的相对介电常数 ε_r=8。根据模型的 y 方向长度，经过计算分析，将仿真时间窗设置为 22 ns。发射天线初始位置位于模型左侧起 0.1 m 处，发射天线 S 和接收天线 R 的距离为 0.05 m，两者共同沿 x 方向向前移动，每次移动 0.02 m。设置 FML 边界层吸收虚假反射。基于 GPRMax 的数值模拟操作过程如图 2 所示。

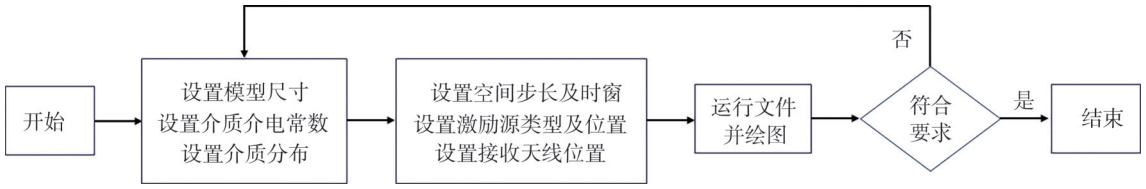


图 2 基于 GPRMax 的数值模拟流程

Fig. 2 Flow chart of numerical simulation based on GPRmax

2.2 模型试验验证方案

2.2.1 类岩体模型制作

物理模型采用文献[22]中报道的模型。鉴于混凝土与岩石相对介电常数 ε_r 均为 7～9[31]，利用木板与混凝土制备类岩体模型，并通过开展 GPR 探测来验证模拟效果。

类岩体模型的制备过程如下：首先，制作 6 个尺寸为 0.8 m×0.6 m×0.3 m 的模具，向其中浇筑 C30 级商品混凝土，以形成岩石基质。在混凝土浇筑刚刚完成时，将厚度为 0.2 cm、截面尺寸为 20 cm×40 cm 的木板插入混凝土中。在混凝土浇筑后、初凝前（通常在浇筑后约 60 min）小心抽拔木板。抽拔的时间应在混凝土仍具有足够塑性、既能保持裂隙形状又不会坍塌的阶段，从而形成预制裂隙。养护环境温度为(20±2) ℃，相对湿度>95%。养护期间模型表面覆盖湿麻布并定期洒水，确保持续湿润。28 d 后，进行脱模处理。类岩体模型的制备流程如图 3 所示。

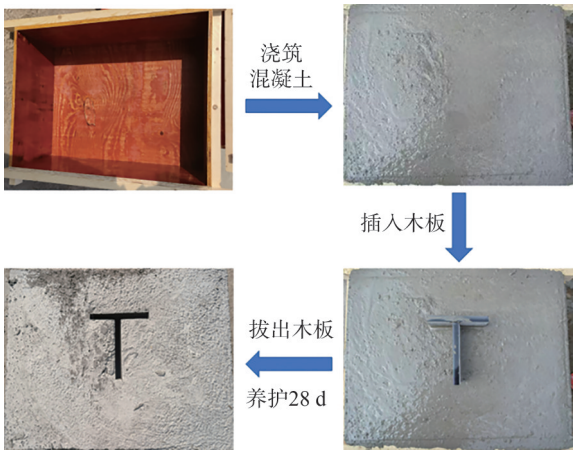
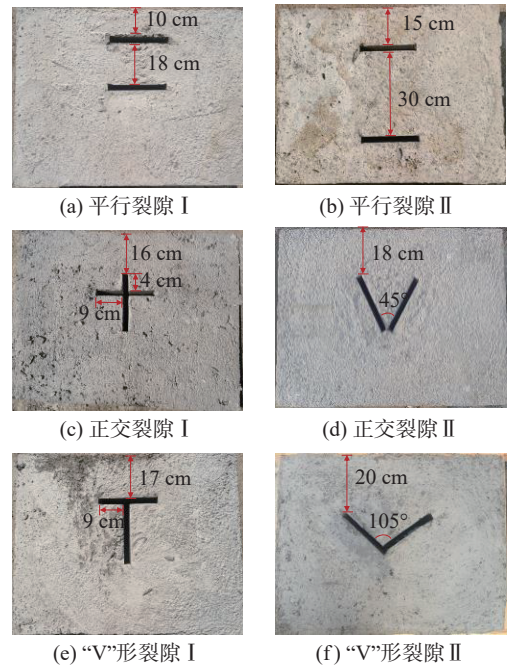


图 3 类岩体模型制作流程[22]

Fig. 3 Flow chart for making rock-like model[22]

采用上述方法制作 6 个尺寸为 0.8 m×0.6 m×0.3 m 的类岩体模型。裂隙形式分别为平行裂隙Ⅰ、平行裂隙Ⅱ、正交裂隙Ⅰ、正交裂隙Ⅱ、“V”形裂隙Ⅰ、“V”形裂隙Ⅱ。图 4 为类岩体模型终凝后的俯视图。



(a) 平行裂隙Ⅰ (b) 平行裂隙Ⅱ

(c) 正交裂隙Ⅰ (d) 正交裂隙Ⅱ

(e) “V”形裂隙Ⅰ (f) “V”形裂隙Ⅱ

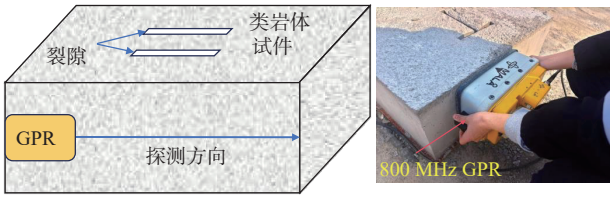
图 4 类岩体模型俯视图

Fig. 4 Top view of rock-like models

2.2.2 GPR 探测试验方案

试验采集设备为瑞典 MALA 公司的 RAMAC 系列探地雷达，选用 800 MHz 屏蔽天线（理论分辨率为 6.5 cm），并通过预试验校准天线–介质耦合效应，确保实测数据与模拟条件一致。GPR 探测试验流程如下：首先，将雷达系统的天线单元与雷达主机进行连接。随后，将雷达主机与数据处理终端通过标准的通信接口相连。然后，由一名实验人员负责拖曳雷达系统，确保雷达天线贴近被测模型的侧面，将触发方式设定为时间模式，保持天线在试件表面匀速移动，获取均匀分布的雷达图像数据；与此同时，另一名实验人员负责监控与操作电脑，并通过软件 Groundversion 获得雷达图像。模型试验示意图如图 5 所示。

由于本文采用小型试样（0.8 m 长度），且模型介质较为单一，故试验获取的雷达图像辨识度较高。基于此，雷达图像的数据处理仅采用对比度增强技术对图像进行视觉优化以避免过度处理导致的关键信号损失。



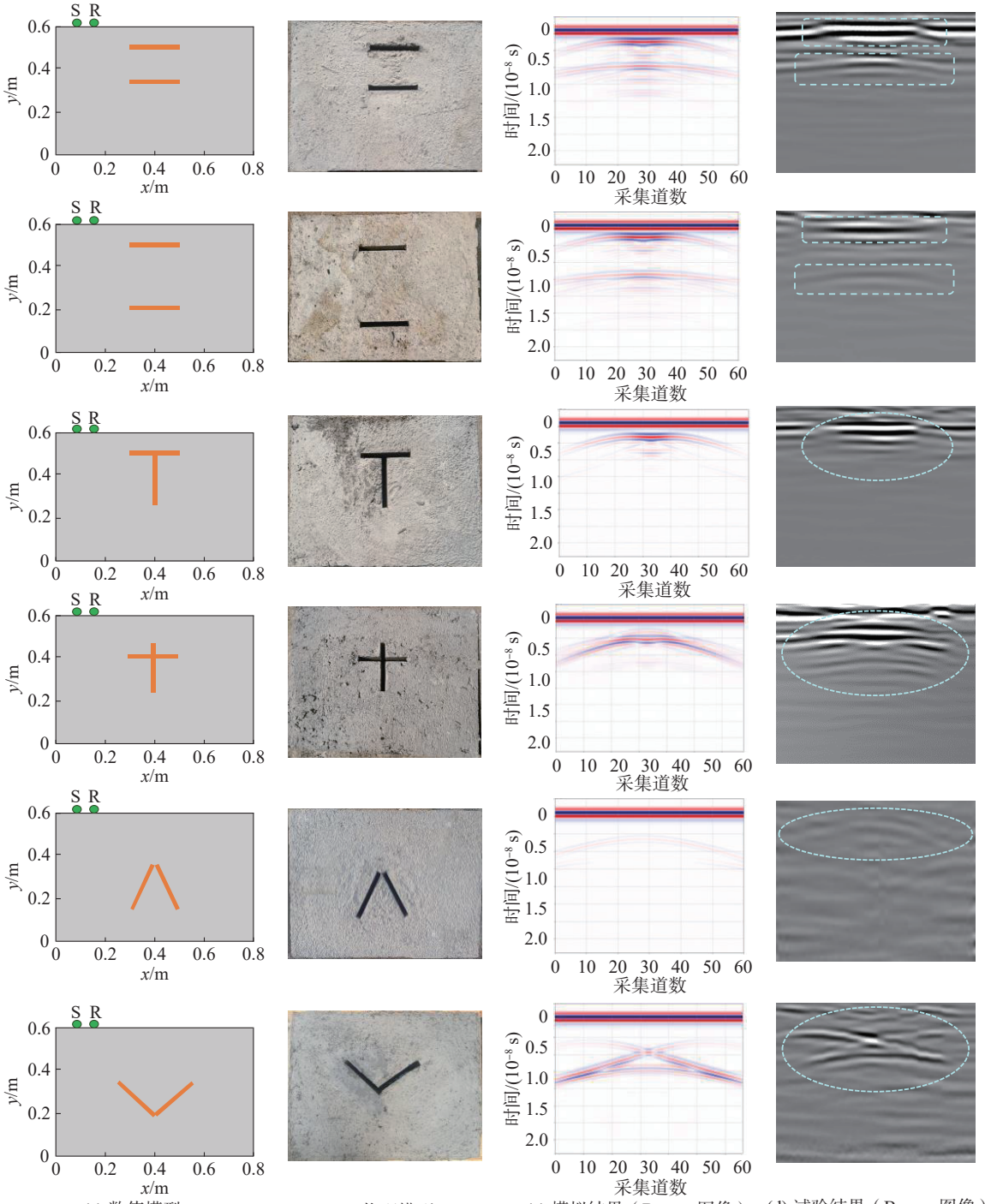
(a) 探测模型　　(b) 操作过程

图5　模型试验示意图[22]

Fig. 5　Schematic diagram of model test[22]

2.3　模型试验验证结果

图 6 为各模型数值模拟与物理试验结果对比。由图 6 可知:对于平行裂隙(第 1、2 行),可见两条清晰平直段反射带,上方反射带的信号强度更强;数值模拟和物理模型中两条反射带之间的距离均随裂隙间距增大而增大,物理试验与数值模拟在探地雷达响应模式上具有高度一致性。对于正交裂隙与“V”形裂隙(后 4 行),可以发现数值模拟与物理模型试验产生的图像间存在



(a) 数值模型　　(b) 物理模型　　(c) 模拟结果(B-scan图像)　　(d) 试验结果(B-scan图像)

图6　数值模拟与物理试验结果对比[22]

Fig. 6　Comparison of numerical simulation and physical test results[22]

少许差异，其主要归因于：1）在实际试验中可能发生边界反射和外部电磁干扰（如环境噪声）；2）实际天线的辐射模式和频率响应的变化可能导致信号偏差；3）信号采集过程中可能存在采样误差、时间同步不准确或仪器噪声等。尽管存在这些差异，但在测试获得的图像与数值模拟图像中，依然能够观察到高度一致的反应模式，这一点在图 6 中蓝色圆圈标记的特定区域尤为显著。例如，在第 4 行的结果中可以观察到，数值模拟结果与模型试验结果均呈现出“X”形交叉伴随下方上凸曲线的响应模式。

综上，物理模型测试的图像呈现出与数值模拟高度一致的响应模式，确保了基于 GPRMax 的数值模拟结果与实际物理模型规律一致，为后续基于 GPRMax 模拟裂隙动态扩展过程的 GPR 响应奠定了基础。

3 裂隙扩展动态过程监测

3.1 水平扩展

本文构建了水平裂隙动态扩展的数值模型。在均质花岗岩介质中设置正交裂隙系统，初始配置为两条等尺度裂隙（长 0.20 m，宽 0.01 m）。保持竖向裂隙几何参数恒定，使水平裂隙左端点以 0.02 m 为步长逐步左向扩展，直至与竖向裂隙形成贯通结构。本文共构建包含 12 个连续扩展阶段的数值模型序列，采用探地雷达正演模拟方法，研究裂隙扩展过程中电磁波场响应特征的演变规律。图 7 为水平裂隙扩展示意图，描述了该裂隙系统的几何演化过程。

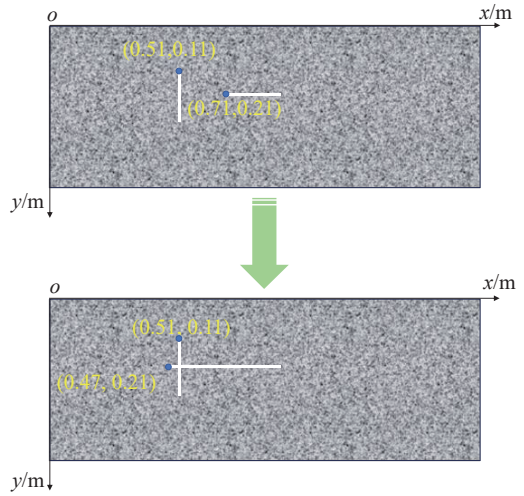


图 7 水平裂隙扩展示意图

Fig. 7 Schematic diagram of horizontal fracture expansion

图 8 系统记录了水平裂隙沿水平方向渐进式扩展时探地雷达响应的动态演化特征。该时序图像集包括 12 组连续模拟数据，自左至右、自上至下，裂隙每向左扩展 0.02 m 记录一组。由图 8 可以发现，当水平裂隙位于竖向裂隙的侧面，两条裂隙相互垂直时，该裂隙系统 GPR 图像呈现出双反射曲线的模式特征，包括一条竖向延展的曲线（推断为竖向裂隙的 GPR 响应）与一条具有顶部平直段的碗状曲线（推断为横向裂隙的 GPR 响应）。随着水平裂隙的渐进式左向扩展，碗状反射波形的顶部平

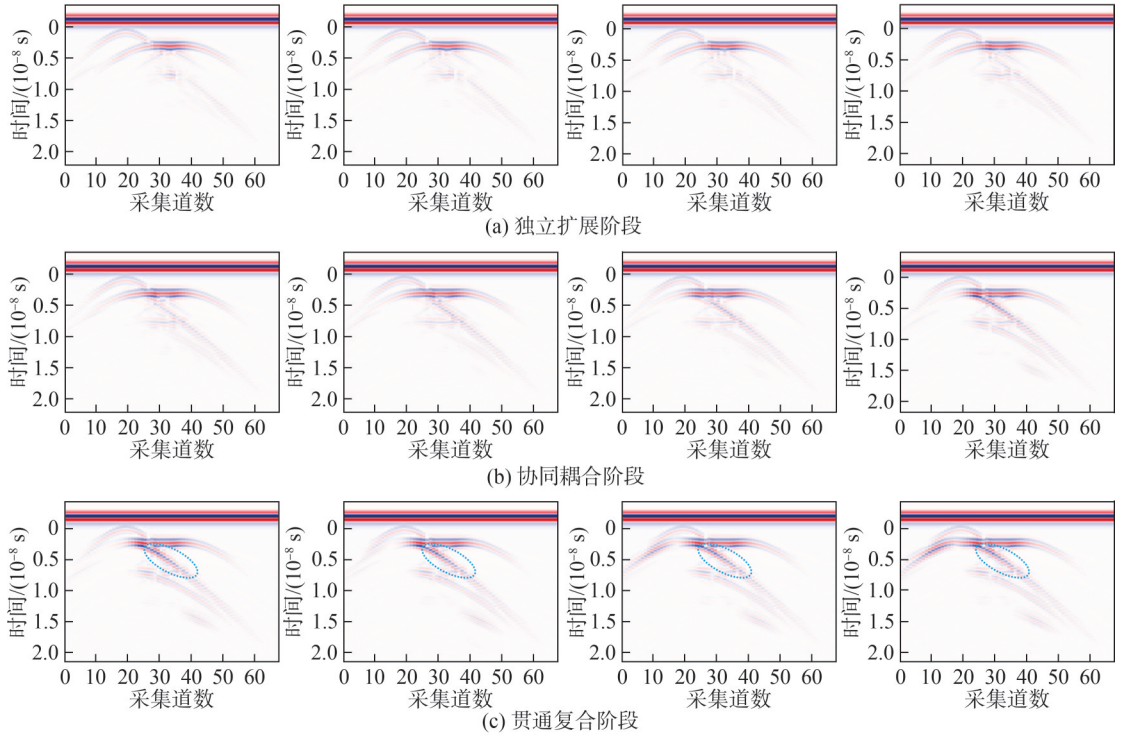


图 8 水平裂隙扩展过程 GPR 动态响应特征

Fig. 8 GPR dynamic response characteristics of horizontal fracture propagation process

直段呈现显著的空间延展特征。根据GPR响应模式的特征，可大致将上述过程分为3个阶段：1）独立扩展阶段（裂隙萌发期）。双通道反射信号呈现明显的空间解耦，两条曲线呈现空间分离状态。分析其物理机制为，裂隙初始扩展时，界面不连续区域较小，电磁波在独立裂隙端部反射，形成独立波场。2）协同耦合阶段（稳定扩展期）。电磁波在裂隙界面处产生时–空耦合效应，引发表现为波场干涉条纹与频谱混叠现象，振幅调制效应增强。分析其物理机制为，裂隙持续扩展导致相邻反射界面间距减小，电磁波在多重界面上发生衍射与相位干涉，形成动态耦合波场。3）贯通复合阶段（裂隙成熟期）。反射信号融合为复合波形，顶部平直段下方出现明显向右下方延展的回波（图8中蓝色圆圈区域），呈现稳定的复合反射结构。

上述系统性分析揭示了一对相互垂直的裂隙系统从独立发育到贯通耦合过程中时域反射特征的演变规律，直观呈现了不同扩展阶段从波场解耦到耦合再至复合的演化过程，证实了探地雷达信号具有解析裂隙扩展多阶段演化的能力，能够有效捕捉到水平裂隙扩展这一动态过程。

进一步地，可以发现，探地雷达不仅能够捕捉水平裂隙动态扩展的过程，还能够反演这一过程中的裂隙端点的空间位置坐标。竖向裂隙的上顶点坐标（x_1，y_1）可以根据图像中竖向延展曲线的顶端相位突变点反演求得。反演方法为：

$$x_1 = n_1 \times \Delta l + x_i \tag{5}$$

$$y_1 = \frac{ct_1}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{6}$$

式（5）、（6）中：n_1为图像中竖向延展曲线的相位突变点对应的采集道数；Δl为道间距，m；x_i为发射天线的初始位置，m；t_1为图像中地面直达波与竖向延展曲线顶端之间的时间差。

横向裂隙的左右端点横坐标x_2、x_3与纵坐标y_2可以根据碗状曲线平直段的左右干涉极值点反演求得。反演方法为：

$$x_2 = n_2 \times \Delta l + x_i \tag{7}$$

$$x_3 = n_3 \times \Delta l + x_i \tag{8}$$

$$y_2 = \frac{ct_2}{2\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{9}$$

式（7）～（9）中，t_2为图像中地面直达波与碗状曲线顶部之间的时间差，n_2、n_3为图像中碗状曲线平直段左、右端点对应的采集道数。

在独立扩展阶段与贯通复合阶段分别选取一幅雷达图像，进行上述反演方法的验证，结果如图9、10所示。

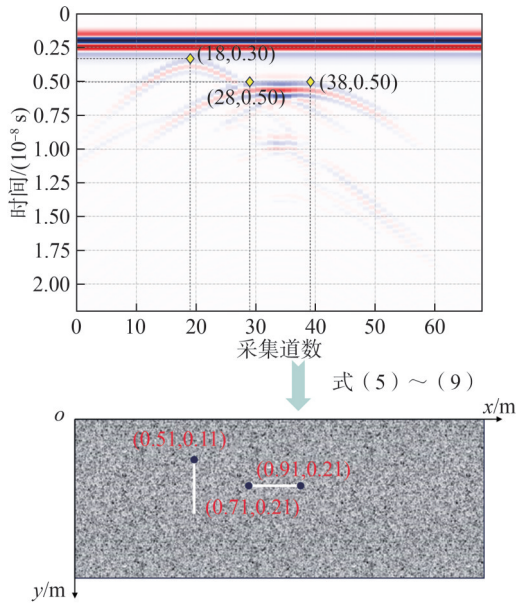


图9　独立扩展阶段裂隙空间位置坐标反演

Fig. 9　Inversion of fracture spatial coordinates in independent expansion stage

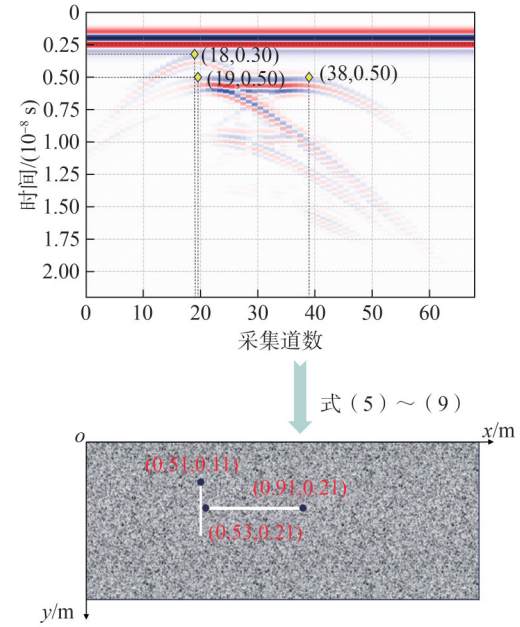


图10　贯通复合阶段裂隙空间位置坐标反演

Fig. 10　Inversion of spatial coordinates of fractures at the stage of coalescence and recombination

表2为裂隙端点空间位置参数的反演分析数据。由表2可知，横向裂隙左右两侧及竖向裂隙顶端的空间坐标反演结果与预设坐标值高度吻合，定位误差均小于5%。这表明根据上述反演方法可以有效计算不同扩展阶段下，一对正交裂隙系统中横向裂隙左右端点及竖向裂隙上端点的空间位置坐标。

以上研究结果可以证实，在水平裂隙横向扩展的过程中，探地雷达既能够通过时域反射特征的连续变化捕捉到这一动态演化过程，又能够基于图像

特征点实现对横向裂隙端点空间位置坐标的反演，发现裂隙扩展所处的阶段，进一步为识别裂隙扩展临界状态（如贯通前兆特征）提供可靠的电磁波场判据。

表 2 裂隙参数反演计算结果对比

Tab. 2 Comparison of inversion calculation results of fracture parameters

位置	独立扩展阶段			贯通复合阶段		
	计算坐标	真实坐标	横（纵）坐标误差/%	计算坐标	真实坐标	横（纵）坐标误差/%
竖向裂隙顶端	(0.51,0.11)	(0.50,0.11)	2.0（0）	(0.51,0.11)	(0.50,0.11)	2.0（0）
水平裂隙左端	(0.71,0.21)	(0.71,0.20)	0（5.0）	(0.53,0.20)	(0.52,0.20)	5.0（0）
水平裂隙右端	(0.91,0.21)	(0.90,0.20)	1.1（5.0）	(0.91,0.21)	(0.90,0.20)	1.1（5.0）

3.2 竖向扩展

3.2.1 自下而上扩展

图 11 为竖向裂隙自下而上扩展过程中初始状态与最终状态下的岩体裂隙模型。

图 12 为竖向裂隙沿竖直方向自下而上渐进式扩展时探地雷达响应的动态演化特征。该时序图像集包括 12 组连续模拟数据，自左至右、自上至下，裂隙每向上扩展 0.02 m 记录一组。

根据图 12，对竖向裂隙与水平裂隙的耦合响应特征分析表明，在正交裂隙系统中，当竖向裂隙位于水平裂隙下方时，雷达剖面呈现出顶部较为平缓的单条曲线特征。根据裂隙扩展过程中探地雷达图像的动态演化特征，同样将其响应机制划分为两个典型阶段。第一阶段（裂隙扩展期）：当竖向裂隙自下而上延伸但尚未接触水平裂隙时，此时观察到，前 8 组时序图像呈现高度相似性，图像中曲线的空间定位保持稳定，只有顶部平缓段

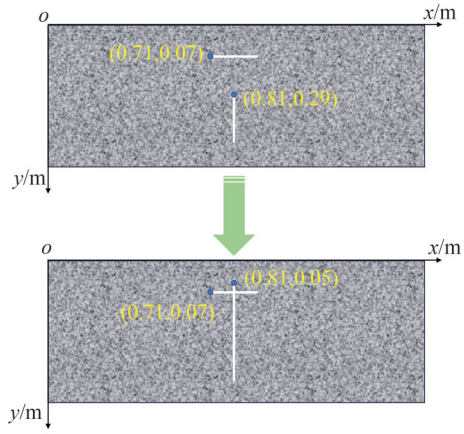


图 11 竖向裂隙自下而上扩展示意图

Fig. 11 Schematic diagram of vertical fracture expansion from bottom to top

下方出现弱振幅波动，这在实际的 GPR 图像中是很难观察到的。该现象源于裂隙系统的几何遮蔽效应——上覆水平裂隙形成的连续波阻抗界面阻断了下方竖向裂

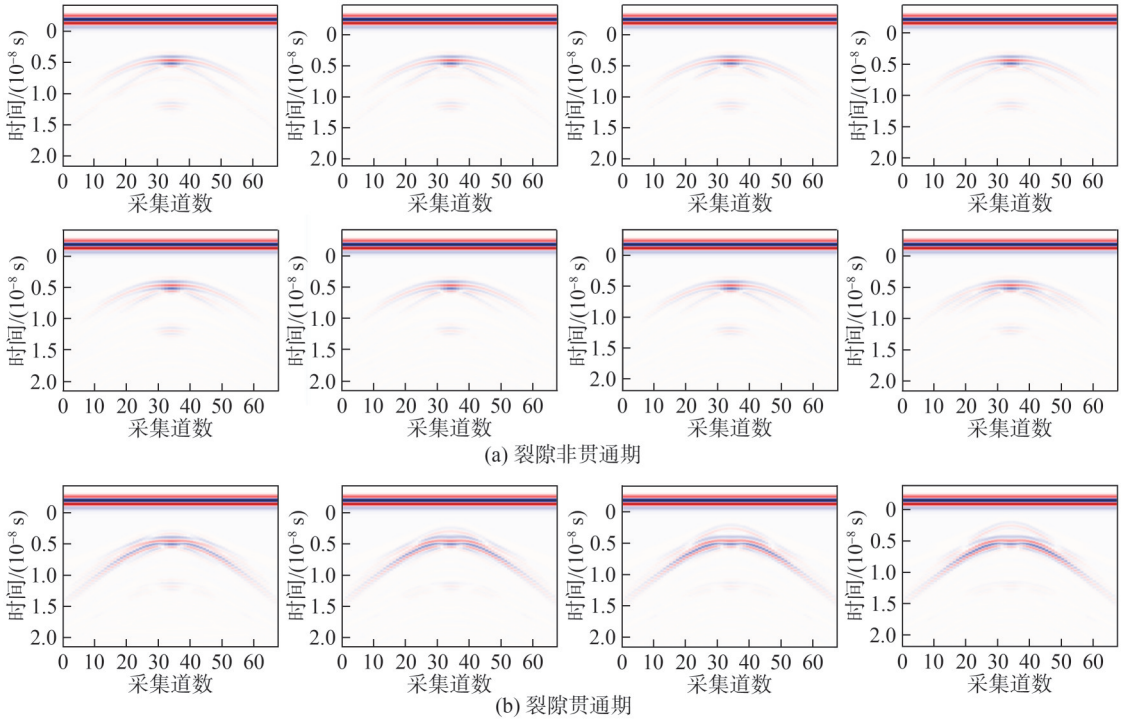


图 12 竖向裂隙自下而上扩展过程 GPR 动态响应特征

Fig. 12 GPR dynamic response characteristics of vertical fracture propagation process from bottom to top

隙顶点的有效散射,导致雷达波能量主要通过水平裂隙界面产生单一反射路径。此时,竖向裂隙的扩展信息被掩蔽在水平裂隙的强反射背景场中。第二阶段(裂隙贯通期):当竖向裂隙延伸贯通水平裂隙时,雷达剖面发生显著形态转变。1)原始平缓反射曲线中叠加出现垂向延伸的双曲线特征;2)形成水平–垂直复合反射结构。其物理机制为贯通后竖向裂隙上端点突破几何遮蔽层,形成新的有效散射源。此时,电磁波可通过水平裂隙界面—竖向裂隙端点的双路径传播,在时域形成特征性干涉波形,该现象可通过绕射波路径分析进行有效辨识。

在竖向裂隙自下而上独立扩展阶段,由于电磁波信号受横向裂隙的遮蔽效应影响,基于单一探测角度的雷达图像难以有效识别竖向裂隙的空间发育特征,导致无法完整记录裂隙向上扩展的运动轨迹。只有当竖向裂隙与水平裂隙形成贯通结构后,其垂向延伸轨迹的几何特征方能在雷达图像中显性表征,此时可通过反射波相位突变点解译裂隙顶端的空间坐标。因此,工程实践中建议采用时序化多方位联合探测技术,通过多方位电磁波入射角度的联合解译,提升独立扩展期裂隙的空间定位精度。

3.2.2　自上而下扩展

图 13 为竖向裂隙自上而下扩展过程初始状态与最终状态下的岩体裂隙模型。

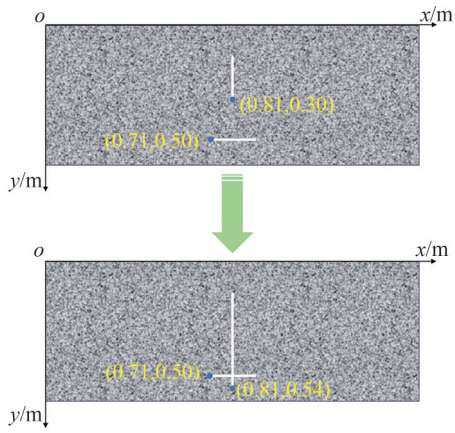


图 13　竖向裂隙自上而下扩展示意图

Fig. 13　Schematic diagram of vertical fracture expansion from top to bottom

图 14 系统记录了竖向裂隙沿竖直方向自上而下渐进式扩展时探地雷达响应的动态演化特征。该时序图像集包括 12 组连续模拟数据,自左至右、自上至下,裂隙每向下扩展 0.02 m 记录一组。

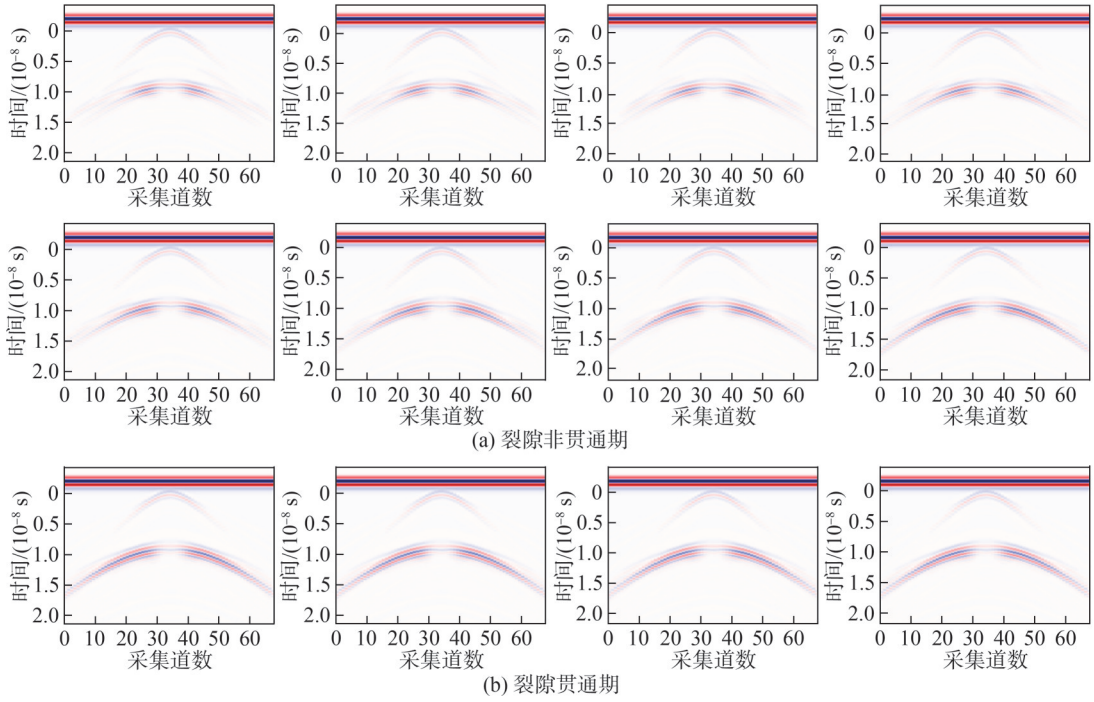


图 14　竖向裂隙自上而下扩展过程 GPR 动态响应特征

Fig. 14　GPR dynamic response characteristics of vertical fracture propagation process from top to bottom

根据图 14,对竖向裂隙与水平裂隙的耦合响应特征分析表明:在正交裂隙系统中,当竖向裂隙位于水平裂隙上方时,雷达剖面呈现上下叠置的双反射曲线。上部反射曲线具有明显垂向拉伸特征(曲率较大),对应竖向裂隙的独立反射界面;下部反射曲线顶部平缓(曲率较小),反映水平裂隙的空间展布特征。根据裂隙扩展过程中探地雷达图像的动态演化特征,同样将其响应机制划分为两个典型阶段。

第一阶段(独立扩展期)。当竖向裂隙自上而下延伸但尚未接触水平裂隙时,此时观察到:1)上部曲线的空间位置与振幅保持稳定,表明竖向裂隙在此过程中下端点未形成显著电磁波散射。推测原因为,狭窄

裂隙对电磁波的反射面积较小，导致反射系数较低，反射能量相对较弱，天线频率限制与采样误差（道间距 Δl=0.02 m）也会影响空间定位精度。2）下部曲线振幅逐步增强，且反射翼向两侧扩展，推测裂隙扩展导致电磁波在双裂隙间形成裂隙—裂隙—围岩多重反射路径，增强了水平裂隙的散射能量。

第二阶段（裂隙贯通期）。当竖向裂隙延伸至水平裂隙并形成贯通结构时，图像模式特征如下：后 4 组连续观测图像呈现高度相似性，下部反射曲线不再出现振幅变化，其空间定位趋于稳定。这种现象源于贯通后形成的复合裂隙体系——水平裂隙对竖向裂隙下端产生几何遮挡，导致该处无法形成有效的波阻抗差异界面，从而抑制了电磁波的二次反射。此时，雷达波能量主要通过上部裂隙界面及周边岩体绕射路径传播。

对于自上而下扩展的竖向裂隙，无论是独立扩展期还是裂隙贯通期，均难以有效解译裂隙下端点空间坐标参数，仅能通过反射波振幅异常特征间接判定裂隙处于独立扩展状态，而无法精确量化其垂向延伸量值。这种局限性也使得单一探测角度的雷达成像难以完整表征裂隙系统的三维动态演化特征。因此，工程实践中需融合多方位电磁波入射角度的相位–振幅联合分析技术，同时联合低频（穿透深度高）与高频（分辨率高）天线数据，平衡探测范围与精度，实现裂隙空间位置参数的连续反演。

4 讨 论

本文系统揭示了探地雷达（GPR）对正交裂隙系统动态扩展过程的响应特征，并验证了裂隙端点空间坐标反演方法的可靠性。但结合现有成果与本文研究发现，GPR 在裂隙动态监测中仍存在若干技术瓶颈，需进一步探讨其机理并优化解决方案。

在裂隙独立扩展阶段，信号遮蔽效应显著制约了 GPR 的监测能力。例如，竖向裂隙自下而上扩展时，上覆水平裂隙的强反射界面会掩蔽下方未贯通裂隙的散射信号，导致其空间位置参数难以解译（图 11）。类似地，自上而下扩展的竖向裂隙下端点因反射能量微弱且受多重路径干扰，其垂向延伸轨迹的动态捕捉存在技术瓶颈，表明单一探测角度下 GPR 信号对未贯通裂隙的解析能力有限。此外，现有反演方法对裂隙下端点的定位精度不足，仅能通过振幅异常间接判断扩展阶段（图 13），无法满足工程定量分析需求。

本文采用的类岩体模型为均质材料，且裂隙设定为空气填充。然而，实际岩体具有显著的非均质性（如矿物成分变化，存在微裂隙、层理等），且裂隙常被水、黏土、方解石等物质填充。未来的研究可以在模型中引入可控的非均质性（如骨料级配变化、分层浇筑），以研究其对雷达信号和裂隙识别的影响，并系统地研究不同填充物及其非均匀度对裂隙雷达反射信号振幅、相位和波形的影响规律。

在工程实践中，为实现对裂隙系统渐进式扩展的动态识别，需发展时序化多方位联合探测技术。通过融合多角度电磁波入射的相位–振幅信息，建立裂隙空间坐标与波场特征的动态耦合模型，在裂隙不同发育阶段实现其空间位置参数的连续反演。例如，在竖向裂隙贯通阶段，不同入射角度的雷达图像可捕捉到绕射波路径差异，结合干涉条纹与频谱混叠特征，能够有效区分新旧裂隙的几何形态。对于具有坡度的实际岩质边坡，探地雷达监测需确保天线与坡面良好耦合。常用的方法包括使用可调支架或适配器使天线保持与局部坡面垂直、在坡面铺设网格线进行系统性测线布置、采用密集点测结合三维成像技术等。对于人员难以接近的岩质边坡，可以通过无人机（UAV）或机器人搭载系统及固定式监测系统实现高危区域的裂隙状态评估。这些新兴应用方式对完善裂隙网络动态监测技术体系具有重要工程应用价值。

此外，针对基于 GPR 的岩体裂隙扩展动态监测，仍有若干问题值得进一步研究。例如：1）人工智能驱动的高效反演。引入深度学习框架（如卷积神经网络、Transformer），实现 GPR 图像的自动化裂隙识别与参数反演，减少人工解译的主观误差。2）多尺度监测技术融合。联合钻孔摄像、声发射与 GPR 数据，建立从微观裂隙萌发（毫米级）到宏观贯通（米级）的多尺度动态监测体系。3）长期监测系统标准化。制定 GPR 动态监测的工程操作规范，包括天线布设方案、数据采集频率及信号处理流程，推动技术的规模化应用等。

5 结 论

1）物理试验验证了基于 GPR 的裂隙监测与基于 GPRMax 的数值模拟的可行性。基于 GPRMax 的数值模拟与类岩体物理试验结果表明，GPR 技术能够有效捕捉岩体裂隙的电磁波响应特征，验证了 GPR 在岩体裂隙动态监测中的适用性；不同分布形式裂隙的模拟图像与实测数据在反射模式、信号强度及空间定位上高度一致，为基于 GPRMax 的岩体裂隙动态监测的数值模拟研究提供了理论支撑。

2）GPR 可解析裂隙扩展的多阶段动态演化特征。研究揭示了一对正交裂隙系统中裂隙扩展过程 GPR 信号的阶段性响应规律。水平扩展表现为 3 阶段特征：独立扩展阶段（裂隙萌发）、协同耦合阶段（干涉条纹与频谱混叠）及贯通复合阶段（复合反射结构）；竖向

扩展则呈现两阶段特征:独立扩展期(信号遮蔽或弱散射)和裂隙贯通期(复合反射形成)。两类扩展方向的差异源于裂隙几何构型对电磁波传播路径的影响,水平扩展因多界面干涉更易形成阶段性耦合响应,而竖向扩展的GPR响应会受遮蔽效应与狭窄裂隙弱反射效应的限制。

3)水平扩展裂隙参数反演方法具有较高精度。针对水平扩展裂隙,基于相位突变点与干涉极值点的反演模型能够有效定位裂隙端点,其左右端点及竖向裂隙顶端坐标的定位误差均小于5%。然而,竖向扩展裂隙的反演存在限制:自下而上扩展时,上覆裂隙遮蔽未贯通区域的散射信号;自上而下扩展时,裂隙下端反射能量微弱且受多重路径干扰,导致垂向延伸轨迹的定量反演精度不足。

4)单一探测角度下,GPR对未贯通裂隙的监测存在遮蔽效应与精度限制。精度受限源于物理因素(裂隙狭窄界面的弱反射、介质非均质性)与技术因素(天线分辨率、采样误差及环境噪声),需通过时序化多方位联合探测(抑制遮蔽效应)、多频数据融合(平衡穿透深度与分辨率)及AI驱动的高效反演(如CNN自动提取干涉特征)构建高精度监测体系,以提升GPR监测岩体裂隙精度。

综上,研究为岩体裂隙动态扩展的实时监测提供了新方法,在岩体稳定性评估与岩体破坏前兆特征识别中具有潜在应用价值。然而,需要指出的是,本文研究成果距工程规模化实际应用尚存在较大差距:裂隙充填物非均质性对电磁波传播的干扰、多裂隙网络动态交互的耦合效应、大规模场景下监测数据的快速解译等问题尚未完全解决。未来需重点突破裂隙充填非均质性干扰抑制、多裂隙网络动态耦合机理解析及大规模雷达数据解译算法开发等技术瓶颈,结合多尺度监测技术融合与标准化工程方案,推动GPR技术从实验室向复杂工程场景跨越。

参考文献:

[1] Li Shucai,Liu Hongliang,Li Liping,et al.Quantitative characterization method and engineering application of rock mass structure in tunnel face based on digital images[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(1):1–9.[李术才,刘洪亮,李利平,等.基于数码图像的掌子面岩体结构量化表征方法及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):1–9.]

[2] Wu Na, Liang Zhengzhao, Zhang Zhenghu, et al. Development and verification of three-dimensional equivalent discrete fracture network modelling based on the finite element method[J].Engineering Geology,2022,306:106759.

[3] Zhuang Duanyang, Ning Zexu, Argilaga A, et al. Stability analysis of jointed rock mass in large underground Caverns based on multi-scale analysis method[J]. Transportation Geotechnics,2023,42:101109.

[4] Li Ming,Deng Hui,Tu Guoxing.A study of rock mass properties based on discrete fracture network modeling and compression damage process[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2024,83(10):402.

[5] Guo Ping,Zeng Xinggui.Study on propagation law of collinear water-bearing fractures in rock mass under dynamic and static loads[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(10):198–209.[郭萍,曾兴贵.动静荷载作用下岩体共线含水裂隙扩展规律研究[J].水利水电技术(中英文),2022,53(10):198–209.]

[6] Liu Xinrong,Zhang Jilu,Zhou Xiaohan,et al.Study on deformation and seepage characteristics of fractured rock mass with through cracks considering axial stress[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(12):3596–3612.[刘新荣,张吉禄,周小涵,等.考虑轴向应力作用的贯通裂隙岩体变形及渗流特性研究[J].岩土力学,2024,45(12):3596–3612.]

[7] Sun X Z,Li J Z.Numerical study on crack propagation characteristics under different loading conditions by FRACOD2 D approach[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2019,37(1):61–69.

[8] Zoback M D,Barton C A,Brudy M,et al.Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(7/8):1049–1076.

[9] Zou Xianjian,Wang Yiteng,Wang Chuanying.Three-dimensional morphological features of rock structural surfaces and dominant anti-slip direction using the borehole images[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 290–298.[邹先坚,王益腾,王川婴.钻孔图像中岩石结构面三维形貌特征及优势抗滑方向研究[J].岩土力学,2020, 41(S1):290–298.]

[10] Liu Cancan,Zheng Xigui,Wang Shulong,et al. Intelligent recognition system of structural planes based on borehole imaging[J].Journal of Mining and Safety Engineering,2024,41(4): 720–729.[刘灿灿,郑西贵,王术龙,等.基于钻孔成像的结构面智能化识别系统[J].采矿与安全工程学报,2024, 41(4):720–729.]

[11] Renard F, Bernard D, Desrues J, et al. 3D imaging of fracture propagation using synchrotron X-ray microtomography[J]. Earth and Planetary Science Letters,2009,286(1/2): 285–291.

[12] Zhou Hui, Cheng Guangtan, Zhu Yong, et al. Reconstruction method and mechanical properties of natural rock structural surfaces based on 3D scanning and 3D engraving technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 417–425. [周辉,程广坦,朱勇,等.基于三维扫描和三维雕刻技术的岩石结构面原状重构方法及其力学特性[J].岩土力学, 2018,39(2):417–425.]

[13] Xu Du, Feng Xiating, Li Shaojun, et al. Laser scanning tech-

nology for tunnel deformation and rock mass structural plane testing and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1336–1343. [许度, 冯夏庭, 李邵军, 等. 激光扫描隧洞变形与岩体结构面测试技术及应用[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1336–1343.]

[14] Mao Yanjun, Chen Xi, Fan Chaonan, et al. Study on crack propagation law of water-injected coal-rock mass based on CT three-dimensional reconstruction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(6): 1717–1726. [毛彦军, 陈曦, 范超男, 等. 基于 CT 三维重建的注水煤岩体裂隙扩展规律研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(6): 1717–1726.]

[15] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1993, 30(7): 883–899.

[16] Wang Weihua. Recognition algorithm of AE signal of rock fracture based on multiscale 1DCNN-BLSTM[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2024, 2024: 3717867.

[17] Chen Yunjuan, Gao Tao, Gao Chenglu, et al. Fracture propagation and acoustic emission energy damage law of fractured rock mass under hydro-mechanical coupling[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2022, 53(6): 2325–2335. [陈云娟, 高涛, 高成路, 等. 水力耦合作用下裂隙岩体破裂扩展及声发射能量损伤规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2325–2335.]

[18] Toshioka T, Tsuchida T, Sasahara K. Application of GPR to detecting and mapping cracks in rock slopes[J]. Journal of Applied Geophysics, 1995, 33(1/2/3): 119–124.

[19] Tzanis A. A versatile tuneable curvelet-like directional filter with application to fracture detection in two-dimensional GPR data[J]. Signal Processing, 2017, 132: 243–260.

[20] Arosio D. Rock fracture characterization with GPR by means of deterministic deconvolution[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 126: 27–34.

[21] Qin Zhen, Huang Bolin, Zhang Peng. Study on response law of internal macroscopic fractures in karst bank slope based on ground-penetrating radar detection[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 628–639. [秦臻, 黄波林, 张鹏. 基于探地雷达检测的岩溶岸坡内部宏观裂隙响应规律研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 628–639.]

[22] Song Zhishu, Zheng Jun, Zhang Ruichen, et al. The potential of ground penetrating radar in rock fracture detection: Insights from physical model tests and numerical simulations[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2026, 18(4): 2604–2618.

[23] Bai Xu, Yang Yu, Wei Shouming, et al. A comprehensive review of conventional and deep learning approaches for ground-penetrating radar detection of raw data[J]. Applied Sciences, 2023, 13(13): 7992.

[24] Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax[J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(10): 755–762.

[25] Warren C, Giannopoulos A, Giannakis I. GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar[J]. Computer Physics Communications, 2016, 209: 163–170.

[26] Zhang Di, Mo Qimiao. Forward modeling of ground-penetrating radar images for underground pipelines based on GprMax[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(2): 168–182. [张迪, 莫其妙. 基于 GprMax 的地下管线探地雷达图像正演模拟[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(2): 168–182.]

[27] Luo T X H, Lai W W L. GPR pattern recognition of shallow subsurface air voids[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103355.

[28] Li Longjian, Yang Li, Hao Zhongyu, et al. Road sub-surface defect detection based on GprMax forward simulation-sample generation and Swin Transformer–YOLOX[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2024, 18(3): 334–349.

[29] Alsharahi G, Filali Bouami M, Faize A, et al. Contribution of analysis and detection the risks appearing in roads using GPR method: A case study in Morocco[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 1435–1450.

[30] Dai Zhiheng, Zhang Mengxi, Gu Jie. GPR forward modelling and imaging analysis for boulder detection[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, 46(4): 3193–3202.

[31] Daniels D J. Ground Penetrating Radar[M]. London: Institution of Engineering and Technology, 2004.

Identification Method of Dynamic Propagation Process of Rock Fracture Based on Ground Penetrating Radar

CHEN Jun[1], *ZHANG Bo*[2], *ZHUANG Xingyue*[1], *SONG Zhishu*[3], *ZHENG Jun*[3*]

(1.Zhejiang Geological and Mineral Exploration Institute Co., Ltd., Hangzhou 310063, China;
2.Hangzhou Metro Group LLC, Hangzhou 310020, China;
3.College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract:

Objective The stability of rock engineering structures, which is crucial for major national construction projects, strategic security, and environmental protection, is significantly affected by the dynamic propagation of fractures in rock masses. These fractures act as weak planes and seepage channels and can trigger catastrophic events, such as landslides and collapses, as they progressively develop. Although monitoring techniques, such as borehole imaging, computed tomography scanning, and acoustic emission (AE), provide valuable insights, they have limitations

in dynamic tracking, spatial resolution, and engineering applicability, particularly for complex fracture networks. In this study, we address these limitations by proposing a ground-penetrating radar (GPR)-based method to identify the dynamic propagation processes of rock fractures, with the aim of providing a nonintrusive, real-time, and quantitative approach to rock mass stability assessment and early disaster warning.

Methods This research adopted a comprehensive approach that integrated numerical simulations and physical experiments to investigate the complex relationship between rock fracture propagation and GPR signal responses. The study employed GPRMax software, an electromagnetic wave simulation tool, to construct numerical models of orthogonal fracture systems. These models simulated the dynamic evolution of electromagnetic wavefields under three distinct propagation scenarios: horizontal left-to-right extension, vertical bottom-to-top extension, and vertical top-to-bottom extension. Physical experiments were conducted on rock-like specimens prepared using concrete and wood to replicate realistic rock mass conditions to ensure the reliability of these simulations. These specimens, which contained prefabricated fractures, underwent GPR detection, and the resulting data were compared to the numerical simulation results to validate the accuracy of the models.

Results and Discussions GPR data analysis revealed notable insights into the dynamic behavior of rock fractures. During horizontal propagation, the GPR signals exhibited distinct three-stage characteristics. The initial stage, termed “independent expansion”, was characterized by two separate reflection curves corresponding to the individual fractures. As the fractures continued to propagate, they entered the “collaborative coupling” stage, during which the wavefields from each fracture interacted, resulting in interference patterns and amplitude modulation. This stage was characterized by the emergence of wavefield interference fringes and spectral overlap. Finally, the fractures reached the “through-composite” stage, during which the reflection signals merged into a complex waveform and formed a stable composite reflection structure. This stage indicated the complete connection of the fractures and the establishment of a unified wave propagation path. An inversion model developed based on the analysis of phase mutation points and interference extrema demonstrated high accuracy in determining the spatial coordinates of fracture endpoints. The localization errors for the endpoints of horizontally propagating fractures remained consistently below 5%, demonstrating the reliability of this method for real-time monitoring and early warning of fracture propagation. In contrast, the vertical propagation of fractures presented a more complex scenario. When the fractures propagated upward, the “shielding effect” caused by the overlying fracture significantly limited the ability of GPR signals to detect the lower fracture tip. This effect resulted in only two identifiable stages: the “independent expansion” stage, during which the upper fracture primarily influenced the GPR signal, and the “penetration zone” stage, during which the signal changed substantially following the connection of the two fractures. Similarly, when the fractures propagated downward, the weak reflection energy from the lower fracture tip, combined with signal attenuation, limited the ability of GPR to capture the detailed propagation process. Therefore, only the “independent expansion” and “penetration zone” stages were identified, and the accuracy of vertical trajectory inversion was reduced. Therefore, we propose a time-sequenced multi-azimuth joint detection technique. This approach effectively reduced the shielding effect and enhanced the resolution of three-dimensional dynamic fracture evolution by integrating data from multiple GPR antenna positions and incident angles. This technique provided a more comprehensive understanding of the fracture propagation process and captured details that were not detected from a single observation perspective. Furthermore, in this study, we explored the potential integration of GPR with other monitoring techniques and artificial intelligence algorithms. The integration of GPR with borehole imaging and AE data offered a multiscale monitoring approach that provided a more comprehensive representation of the fracture network, from microcrack initiation to macroscale propagation. In addition, the application of deep learning algorithms, such as convolutional neural networks and Transformers, facilitated the automation of GPR image analysis, reduced human bias, and improved the efficiency of data interpretation.

Conclusions The findings of this study demonstrate the considerable potential of GPR technology for dynamically monitoring fractures in rock masses. The proposed method effectively captures the dynamic evolution of fractures and enables reliable spatial localization of fracture endpoints, providing a valuable tool for real-time monitoring and early warning of potential rock mass instability. However, challenges persist in accounting for the heterogeneity of fracture-filling materials, dynamic coupling effects in multiple-fracture systems, and rapid interpretation of large-scale monitoring data. Future studies should focus on developing advanced algorithms to minimize interference caused by nonuniform fracture fillings, clarify dynamic coupling mechanisms, and enhance the accuracy of vertical trajectory inversion. Integrating GPR with other monitoring techniques and artificial intelligence algorithms can further improve rock mass stability assessments and early warning systems for geological disasters, promoting safer and more sustainable rock engineering practices. Addressing these challenges can facilitate the transition of GPR technology from laboratory investigations to complex engineering applications, ultimately contributing to the safety and stability of rock engineering structures worldwide.

Key words: ground penetrating radar; rock mass fracture; dynamic expansion; model test; numerical simulation; parameter inversion

（编辑　李轶楠）

引用格式: Chen Jun,Zhang Bo,Zhuang Xingyue,et al.Identification method of dynamic propagation process of rock fracture based on ground penetrating radar[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):107–119.[陈军,张波,庄兴岳,等.基于探地雷达的岩体裂隙动态扩展过程识别方法[J].工程科学与技术,2026,58(6):107–119.]