

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.014

砂岩体裂隙渗流区的探地雷达信号动态响应机制

安娅菲, 冯 暄, 董泽君, 周皓秋, 张明贺, 杨佳润, 张英浩

(吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130000)

摘要: 裂隙病害是石窟寺较为普遍而广泛存在的病害类型, 水的参与加速了石窟岩体中裂隙的发育, 裂隙渗流成为文物保护中的一项难题。针对石窟寺裂隙渗流问题, 研究了雷达波地下传播特征对砂岩体裂隙渗流的动态响应机制。首先, 依据实际物性参数和 Richards 方程建立了砂岩体裂隙渗流的瞬态模型; 再采用时域有限差分法, 对砂岩裂隙渗流模型进行探地雷达波场数值模拟; 最后, 利用 Hilbert 变换进行瞬时属性的提取, 分析不同渗流时间下的雷达波场响应特征。砂岩体裂隙渗流模拟发现, 裂隙渗流使得岩体渗流区域的介电常数增大, 增强了该区域对雷达波的散射, 导致雷达波散射的瞬时振幅随含水饱和度增大而增大。研究结果为探地雷达实现超精度探测砂岩体微小渗流裂隙提供了重要的理论支撑。

关键词: 探地雷达; 裂隙渗流; 水文模拟; 瞬时属性

中图分类号: TN957

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)10-181-10

Dynamic response mechanism of radar wave propagation characteristics to fracture seepage in sandstone

AN Yafei, FENG Xuan, DONG Zejun, ZHOU Haoqiu, ZHANG Minghe,
YANG Jiarun, ZHANG Yinghao

(College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, Changchun 130000, P. R. China)

Abstract: Fracture-related deterioration is common in grottoe temple rock masses, with water seepage exacerbating the issue, complicating cultural relic preservation. This study explores the dynamic response mechanism of radar wave propagation to fracture seepage in sandstone. Firstly, a transient model, based on physical parameters and Richards equation, is established. Then, the finite difference time domain method is used to numerically simulate the fractured seepage in sandstone with ground-penetrating radar(GPR). Finally, Hilbert transform is used to extract the instantaneous attributes and analyze the radar wave field responses under different seepage durations. Simulation of sandstone fracture seepage reveals that fracture seepage increases the dielectric constant of seepage area, enhances radar wave scattering in this area, and causes the instantaneous amplitude of the radar wave scattering to increase with the increase of water saturation. The results provide an important theoretical support for GPR in detecting micro-seepage fractures in sandstone.

Keywords: ground-penetrating radar; fracture seepage; hydrological simulation; instantaneous attribute

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC1523401); 吉林省教育厅优秀青年项目(JJKH20241253KJ)。

Supported by the National Key Research and Development Program of China(2021YFC1523401), Jilin Provincial Department of Education Outstanding Youth Project(JJKH20241253KJ).

作者简介: 安娅菲(1998-), 女, 博士研究生, 主要从事探地雷达数值模拟及数据处理与解译研究。

通信作者: 冯暄, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail)fengxuan@jlu.edu.cn。

石窟寺作为石质文物的典型代表,具有极高的历史、艺术和科学价值^[1]。近年来,我国对石窟类文物保护的工作力度逐步加大。岩体裂隙渗水病害是我国石窟寺最普遍、危害最严重的病害类型之一,具有渗水通道微小,渗流结构复杂,渗流现象微弱等特点,对它的探测和治理是石窟寺保护工作的重点也是难点。

由于文物的不可再生性,文物裂隙的探测要尽可能地使用无损检测的手段,探地雷达(GPR)是研究和保护具有较高文化和历史价值古代建筑的理想无损探测方法^[2]。裂隙通常是被嵌在均匀岩层中的一层^[3]。探地雷达对裂隙的检测来源于薄层反射理论,裂缝和围岩之间存在电性差异,电磁波在裂缝壁内产生多次反射,使得亚米级波长的电磁波对毫米级孔径的裂缝产生响应(薄层响应)^[4-5]。探地雷达方法已经探讨了对岩体内裂缝的检测^[6-7]。Vickers等^[8]将探地雷达技术使用在墨西哥州的科峡谷印第安遗迹勘探过程中,这是探地雷达在考古与文物保护领域中的首次应用,此后,探地雷达技术频繁地使用在文物保护过程中^[4,9-10]。裂缝控制着岩石中流体的流动^[11]。Giertzuch^[12]把时移差分探地雷达探测法应用于监测生理盐水示踪剂在亚毫米裂隙中的流动。Dong等^[13]利用一种新的时移全极化探地雷达和各向异性分析方法检测毫米尺度裂缝。Eskandari^[14]使用SVD算法分析探地雷达图像以减少杂波,使得目标信号明显增强,该技术能够检测到宽度大于1.3 mm的裂缝。Yulianita Dina^[15]使用天线频率为60 MHz的探地雷达检测湖体渗水,探测出湖体渗水的深度。Guo等^[16]使用时移探地雷达数据绘制土壤中的地下优先流动。研究表明,探地雷达多数应用于工程探测和水文地质领域的裂隙探测,在石窟岩体微裂隙渗流探测方面的研究还应加强。

因此,有必要针对石窟寺裂隙的特点,进行流体渗流过程中电磁波场响应及其机理研究。文中首先构建了砂岩裂隙渗流水文模型,对裂隙水的渗流过程和不同时间点的渗流状态进行了瞬态模拟,随后进行雷达波场数值模拟,分析其波场特征,并利用希尔伯特变换对正演模拟的结果进行瞬时振幅的提取与分析,总结出不同时刻裂隙渗流模型探地雷达的波场与瞬时属性特征。在实际砂岩裂隙渗流的探测中,利用实际的波场特征判断渗流裂隙的位置,对比不同渗流裂隙的含水量大小,为探地雷达实现超精度探测砂岩体微小渗流裂隙提供重要的理论依据。

1 针对裂隙渗流的探地雷达数值模拟方法

将砂岩裂隙水动力学模拟的模型与探地雷达波场数值模拟相结合,分析了裂隙渗流和雷达波响应的机制关系,流程如图1所示。首先,基于Richards方程^[17]和Van Genuchten持水模型^[18]建立砂岩裂隙渗流水文模型,再将水含量转换为雷达波场模拟所需的介电常数和电导率值,通过水含量与瞬时振幅的关系得到雷达波地下传播特征对砂岩体裂隙渗流的动态响应机制。

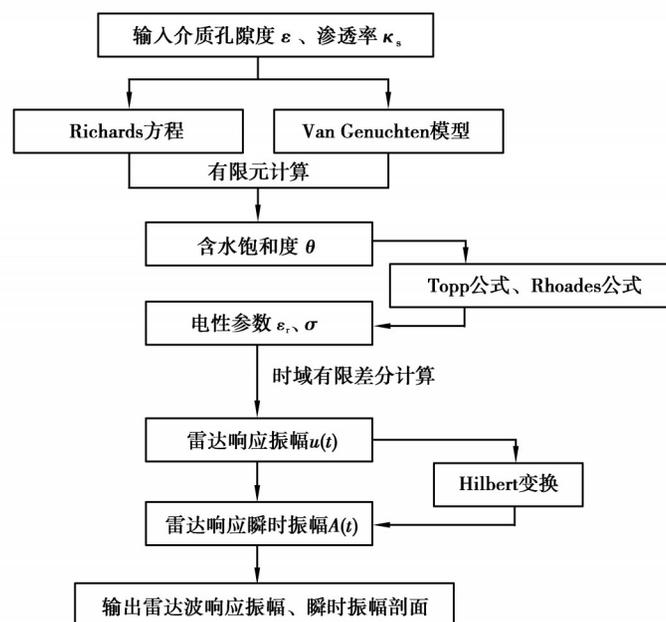


图1 裂隙渗流数值模拟及波场响应分析流程

Fig. 1 Flowchart of numerical simulation and wave field response analysis of fracture seepage

1.1 砂岩裂隙渗流模拟

通过求解渗流场满足的偏微分方程式和边界条件式实现渗流有限元的计算分析。Richards 方程^[17]是由达西定律^[19]演变而来的,描述了可变饱和和多孔介质中的流动,阐述流体在填充某些孔隙并从其他孔隙排出时水力属性的变化,表明非饱和水流也符合达西定律,即非饱和水流的渗流速度也与总土水势能成正比,且与土体中孔隙通道的几何性质有关^[19]。

$$\rho \left(\frac{C_m}{\rho g} + S_c S_p \right) \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \left(-\frac{K_r K_s}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla D) \right) = Q_m, \quad (1)$$

式中: ρ 为液体密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; p 为水头压力, Pa ; D 为位置水头; Q_m 为源项; t 为时间; C_m 表示容水度; S_p 表示储水系数; K_s 表示饱和时的渗透率; K_r 表示相对渗透率; S_c 表示有效饱和度: $S_c = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)}$, 其中, θ 、 θ_s 、 θ_r 分别表示含水量、饱和含水量、残余含水量。

模拟过程中持水函数用 Van Genuchten 模型^[18]进行描述,与 Richards 方程相结合计算模型的含水饱和度和, Van Genuchten 模型表达式为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\kappa h|^n)^m}, & h < 0, \\ \theta_s, & h \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

式中: κ 表示进气值, cm^{-1} ; n 为孔径分布; m 的值需要满足关系 $m=1-1/n$ 。

通过求解 Richards 方程和 Van Genuchten 模型有效模拟了砂岩中裂隙水的渗流过程。在公式(1)中,设置液体密度 ρ 为 $1\,000\text{ kg/m}^3$, 流体动力黏度 μ 为 $10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 表示水的流体属性。根据砂岩性质,在 Van Genuchten 模型中, n 的值被设置为 2。最后,利用 Comsol 软件对式(1)(2)求解,得到岩体裂隙模型在不同时刻的含水饱和度。

1.2 砂岩裂隙渗流电性模型建立

利用探地雷达测定土壤含水率的 Topp 公式^[20],将砂土的含水饱和度代入公式(3)转化为相对介电常数:

$$\varepsilon_r = 3.03 + 9.3\theta + 146.0\theta^2 - 76.7\theta^3, \quad (3)$$

式中: ε_r 表示相对介电常数; θ 表示含水饱和度。砂岩模型电导率可利用砂土含水量与电导率的经验公式进行计算^[21]:

$$\sigma = (1.85\theta^2 + 3.85 \times 10^{-2}\theta) 0.075 + 5.89 \times 10^{-4}, \quad (4)$$

式中, σ 为电导率。

水文模拟结果可以进一步应用于探地雷达数值模拟。利用中公式(3)和(4)可以计算出相对介电常数 ε_r 和电导率 σ ,通过数值模拟得到雷达波场响应振幅。这一过程完成了从水文参数到电性参数,再到雷达波场响应振幅的转换。

1.3 砂岩裂隙渗流探地雷达数值模拟

为了准确地模拟探地雷达探测砂岩体裂隙渗流模型时的电磁波在介质中的传播过程,使用时域有限差分数值模拟进行砂岩体裂隙渗流模型的电磁波场响应计算,完成从电性参数到探地雷达响应振幅的转换。时域有限差分法是一种常用的直接求解偏微分方程边值问题的数值方法^[22]。Yee^[22]提出了 Yee 网格空间离散方式,将目标空间进行网格离散,电场和磁场分量分布于网格之中,在交织的网格空间中电磁场进行交替迭代计算,当数值计算满足稳定性条件并且收敛时,完成计算过程。FDTD 计算方法有很多优点,例如,简单直观易于理解,计算量小,可行性高,被广泛应用于工程领域。

时域有限差分法由麦克斯韦旋度方程的微分形式出发。Maxwell 方程的旋度方程组为

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J, \quad (5)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} - J_m. \quad (6)$$

在直角坐标系中,可以化为

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x, \quad (7)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y, \quad (8)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x, \quad (9)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y, \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z, \quad (11)$$

式中: E 为电场强度, V/m; D 为电通量密度, C/m²; H 为磁场强度, A/m; B 为磁通量密度, Wb/m²; J 为电流密度, A/m²; ε 为介质介电常数, F/m; μ 为磁导系数, H/m; σ 为电导率, S/m; σ_m 为导磁率, Ω /m。

2 砂岩体中陡倾角单裂隙渗流的探地雷达数值模拟

2.1 裂隙水动力学模拟

石窟寺及摩崖造像在我国石质文物中处于主体地位,其内容丰富、规模庞大、数量众多、分布广泛,具有地质体和人工营造建筑及艺术品的双重特征^[23]。石窟寺文物病害定义的范畴,既要考虑石窟寺文物本体的结构及雕塑艺术品的特点,又要考虑依托自然山体地质环境的特点,同时,还要结合我国石窟寺及石刻保护工作的特点和保护实践的需求^[24]。在石窟寺保护领域,石窟寺文物载体的概念是对石窟寺文物本体起支撑作用,并与文物本体结构安全密切相关的构造体及地质环境,包括石窟寺洞窟构筑物与雕刻艺术品所依托的山体,以及相关联的地质体^[24]。文中的研究对象位于重庆大足的北山石刻实验场,与大足石刻摩崖造像相连,是文物本体相关联的地质体。据资料记载,北山造像岩体主要分上下2个岩性层,含多条泥质弱层,上部棕褐色砂岩,对应崖面位置处于石窟造像以上,含3条明显的弱层;下部位于造像砂岩以下,主要为一套紫灰、紫红色厚层块状细粒长石英砂岩和紫红色泥岩、粉砂质泥岩组成,两部分整合接触^[25]。

根据大足北山石刻区域地质条件,建立了砂岩质裂隙渗流模型,模拟了砂岩中裂隙水的渗流过程,结合瞬态计算探究水在岩体内部的渗流规律。建立大小为0.8 m×0.8 m的砂岩体裂隙渗流模型,如图2所示。裂隙起始位置为(0.5 m, 0.8 m),末端位置为(0.3 m, 0.3 m),裂隙厚度 d_f 设置为0.05 m,背景介质为砂岩。裂隙渗流由裂隙顶部端点给定的压力所产生,由公式(1)和(2)计算的裂隙渗流0、1、20、40、80 s时刻的体积含水量模型分别如图3所示。由图可知,当裂隙中有水向外渗出时,形成了裂隙周边的含水区域,以及外围还未入渗的不含水区域。

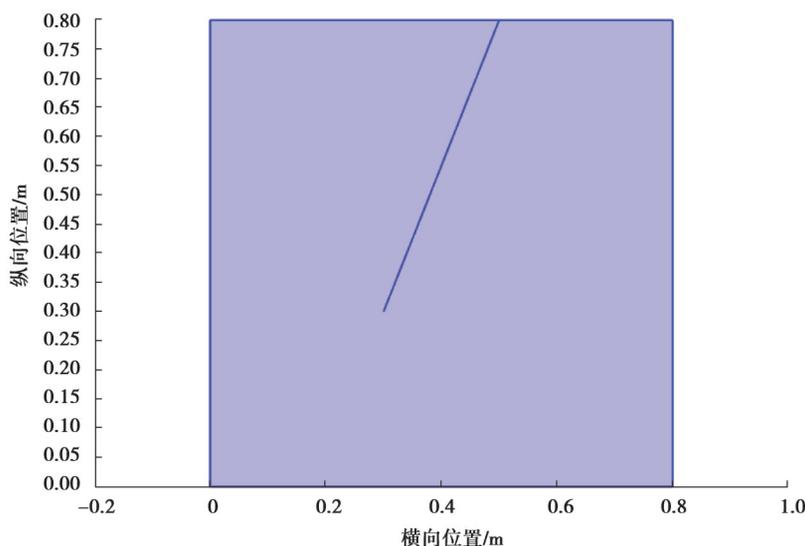


图2 砂岩体裂隙渗流模型

Fig. 2 Fracture seepage model of sandstone

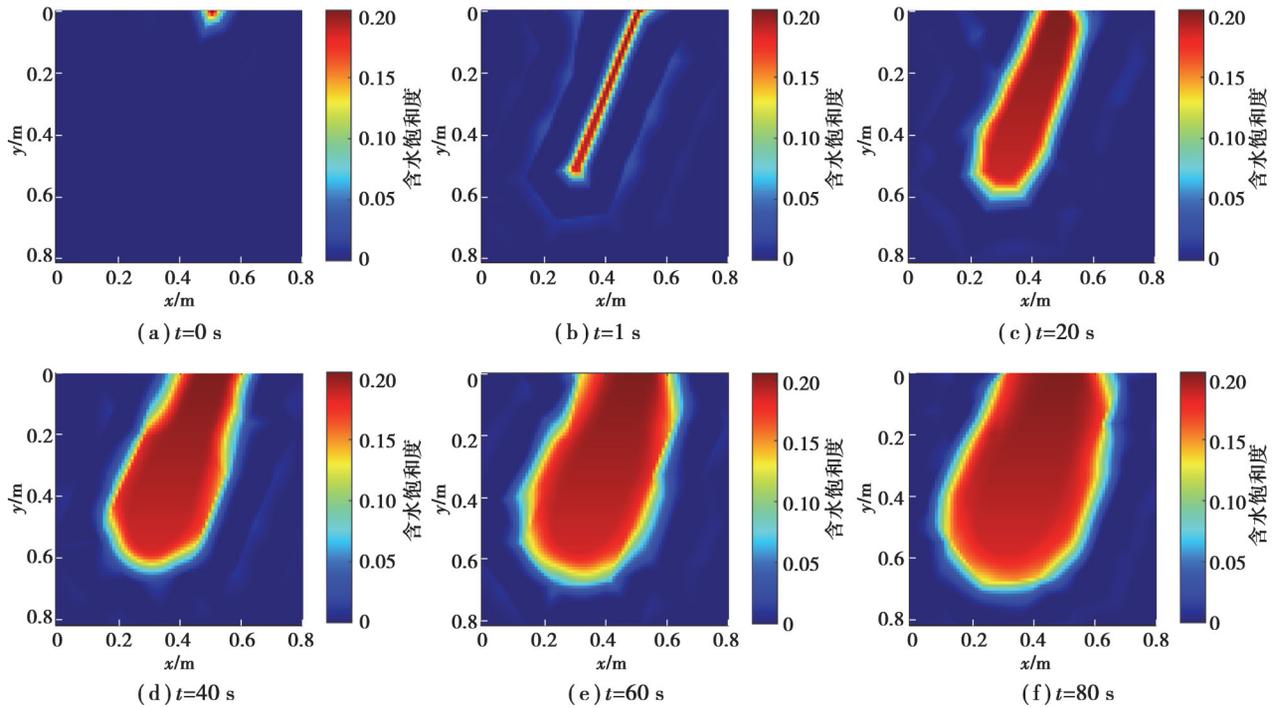


图 3 不同渗流时刻的含水饱和度模型

Fig. 3 Water saturation model at different seepage durations

2.2 裂隙渗流电性模型和探地雷达数值模拟

对上文 6 个时刻的渗流模型进行探地雷达数值模拟。正演模拟参数如表 1 所示。其中,激励源采用雷克子波,天线中心频率为 1.6 GHz。天线距离模型 5 cm,采用发射天线和接收天线同时移动的方式,每移动 2.5 cm 采集一道数据,每个模型共采集了 26 道数据。由含水饱和度与模型介电常数的关系公式(3)计算得到数值模拟 0、1、20、40、60、80 s 时刻的渗流介电模型如图 4 所示。

表 1 gprMax 数值模拟参数

Tabel 1 gprMax numerical simulation parameters

参数类型	数值
正演模型大小/m×m	0.81×0.9
空间网格步长/m	0.0025
时窗/s	1e-8
发射天线初始坐标/m	(0.05,0.85)
天线步进距离/m	0.025
收发天线间距/m	0.05
激励源类型	雷克子波
激励源频率/GHz	1.6
测线道数	26

图 5 分别对应图 4 渗流时刻的模型模拟结果,从雷达剖面可以看出,由于渗流点与周边围岩介电常数的差异,雷达的反射波在剖面中呈现双曲线的形态。但随着水不断在介质中扩散,含水的高介电常数介质的面积不断扩大,双曲线特征逐渐消失。

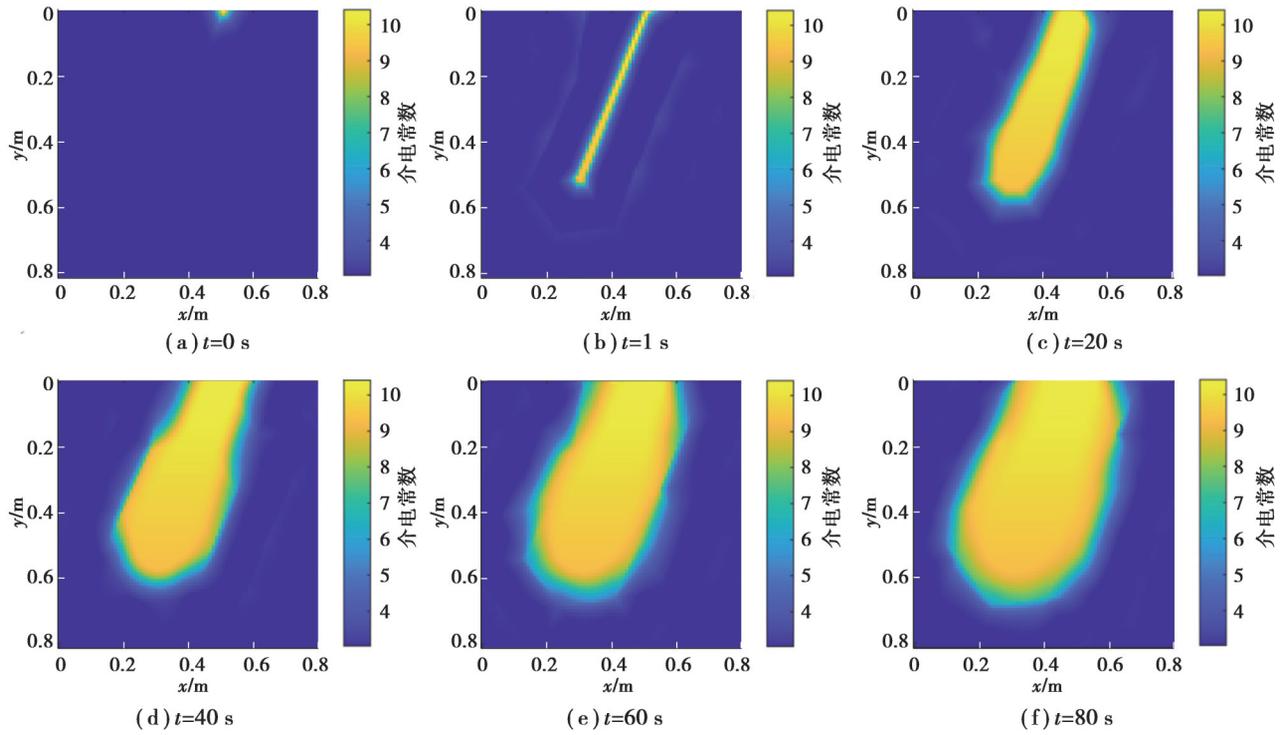


图 4 基于水文模拟的含水饱和度构建的介电常数模型

Fig. 4 Dielectric constant model based on water saturation of hydrological simulation

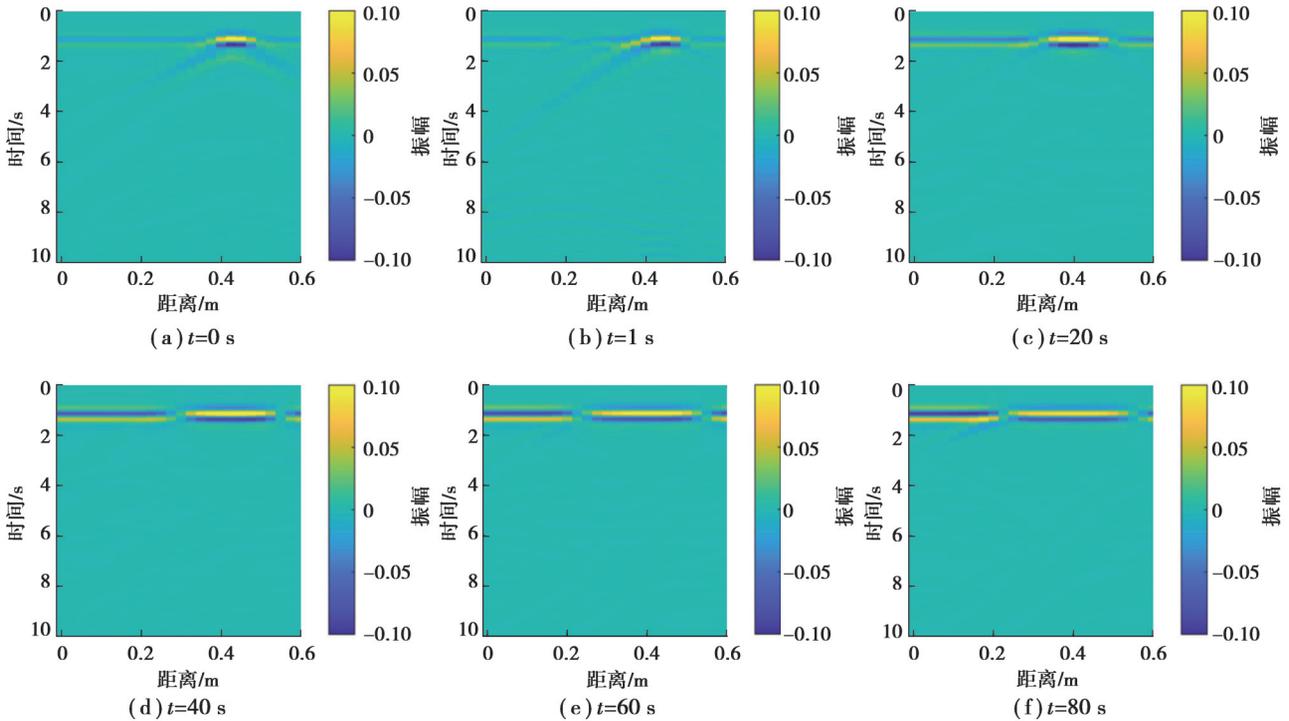


图 5 基于图 4 模型的探地雷达正演模拟结果

Fig. 5 Forward simulation results of GPR based on the model in Figure 4

3 分析

3.1 瞬时振幅属性提取

使用时域有限差分法进行探地雷达数值模拟得到时间域内的信号 $E_z(t)$, 使用 Hilbert 变换实现瞬时信号

的提取。Hilbert变换是复信号分析中一项重要的工具,Hilbert变换又称为 90° 相移滤波,实质是将信号的相位谱做 90° 相移,而保持振幅谱不变^[26]。在时间域内连续信号 $E_z(t)$ 的Hilbert变换定义为

$$v(t)=H[E_z(t)]=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{u(\tau)}{t-\tau}d\tau。 \quad (12)$$

由式(12)可知Hilbert变换就是在时间域内将一个原始信号与Hilbert变换因子 $h(t)=\frac{1}{\pi t}$ 进行卷积运算。

瞬时属性的概念来源于地震勘探。虽然,地震勘探与探地雷达所测参数和源不同,但有着相同的运动学特征,因此,地震勘探中的研究手段也可以用于探地雷达的采集和处理^[27]。Young等^[28]首次把地震属性分析技术用于探地雷达数据分析;Senecha等^[29]用地震处理和解释软件进行探地雷达属性的提取和分析,探地雷达属性分析技术取得了较大进展。瞬时振幅可以衡量探地雷达反射波的强度,反映能量因介质介电常数差异、介质吸收和传播距离等因素变化而发生的衰减趋势。从数学计算公式角度分析,瞬时振幅等于探地雷达反射信号的实部和虚部总能量的平方根,可有效地突出特殊岩层的变化情况^[30]。探地雷达接收天线中接收的电磁波信号的三角函数表达式为

$$E_z(t)=A(t)\cos[\omega_0t+\varphi(t)]。 \quad (13)$$

经过Hilbert变换后可得到一个解析信号 $z(t)$,其表达式如下:

$$z(t)=E_z(t)+jv(t)=A(t)e^{-j\theta(t)}, \quad (14)$$

式中, $A(t)$ 即为瞬时振幅。

探地雷达属性分析能够提取雷达反射波中记录的信息。对预处理后的原始信号 $E_z(t)$ 使用公式(12)进行Hilbert变换得到瞬时振幅 $A(t)$,并做出图6不同时刻渗流模型的瞬时振幅剖面。瞬时振幅正比于该时刻雷达反射信号总能量的平方根,体现了因介质介电常数差异、介质吸收和传播距离等变化而发生的能量衰减趋势^[31]。由瞬时振幅属性剖面可以看出,随着渗流时间的增加渗流面积不断扩大,导致电磁波传播穿过介电常数较高的区域时发生强反射,能量较强的亮带因此不断变宽。

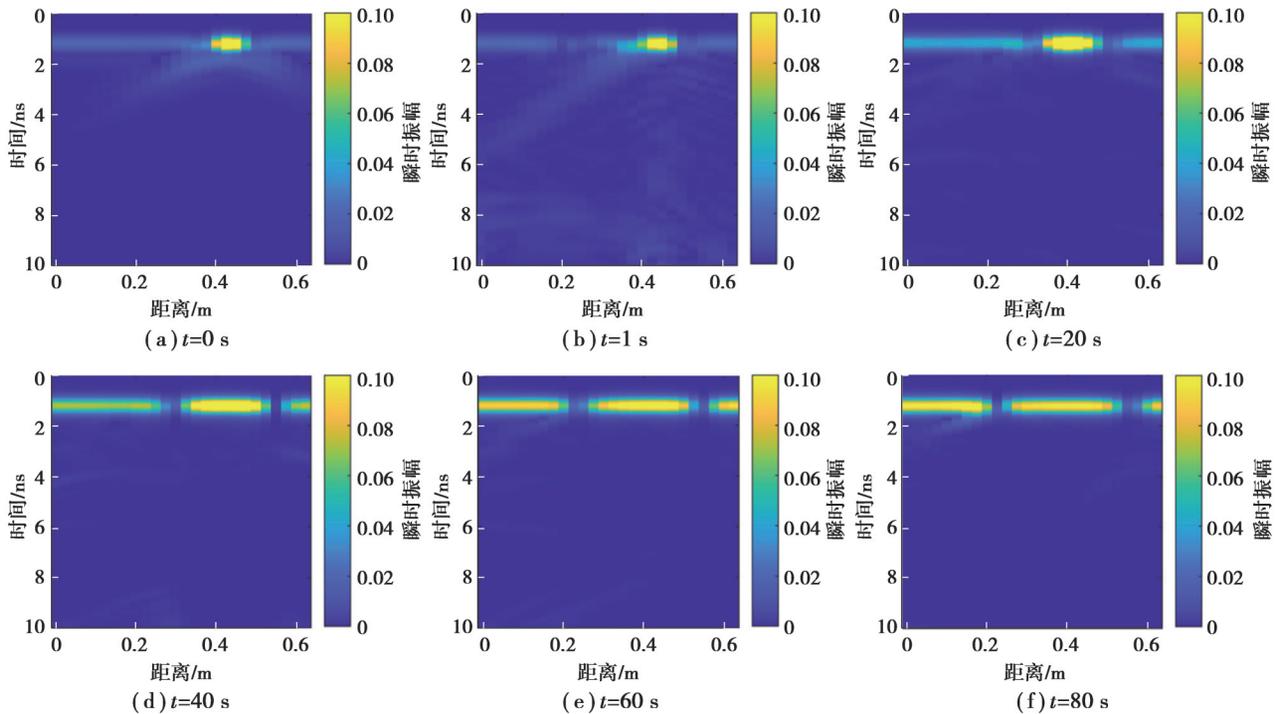


图 6 基于图5数据的探地雷达瞬时振幅剖面

Fig. 6 Instantaneous amplitude profile of GPR based on the data in Figure 5

3.2 含水饱和度与瞬时振幅关系

为了更清晰地分析含水饱和度与雷达响应特征之间的关系,选取了20、40、60、80 s时刻部分单道信号的瞬时振幅最大值,提取其对应的含水饱和度,得到含水饱和度与瞬时振幅交会图,如图7所示。通过函数拟合,得到雷达反射波瞬时振幅随饱和度变化的曲线。可以看出,瞬时振幅与含水饱和度成正比关系,表明随着渗流时间的增加,含水饱和度不断增大,雷达反射波的振幅也随着增大。

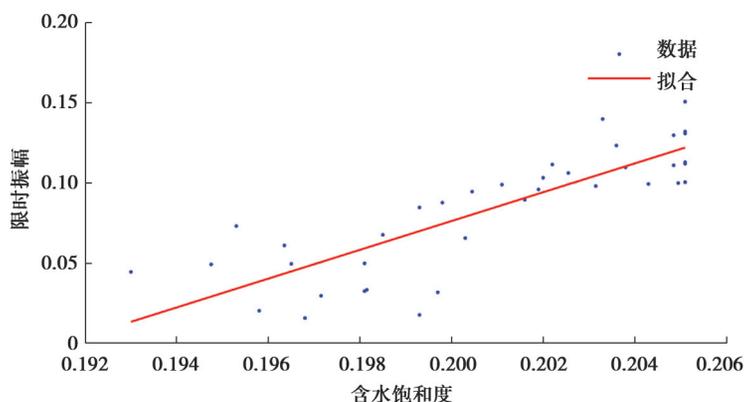


图7 含水饱和度与瞬时振幅关系图

Fig. 7 Relationship between water saturation and instantaneous amplitude

4 结论

文中提出了一种基于水文模型和探地雷达数值模拟分析石窟岩体裂隙渗流区探地雷达瞬时属性响应特征的方法。水文建模模拟了水在裂隙中的流动以及在围岩中的扩散现象,基于结果建立了不同渗流时刻的介电常数模型,进行探地雷达正演模拟,分析了含水饱和度与雷达反射波瞬时振幅之间的关系。得出以下结论,在0 s时刻,渗流处于初始值时刻,渗流点相当于类表面散射体,雷达响应呈双曲线特征;在1 s时刻,渗流区只有距裂隙周围很近的地方,渗流体积很小,渗流区和含水裂隙与所使用电磁波的波长相比可近似为一个长度无限长宽度较小的偶极子散射体,雷达剖面呈现双曲线特征^[32];在20、40、60、80 s时刻,渗流区面积不断扩大,渗流模型相当于平面散射体,双曲线特征消失。在瞬时振幅剖面的结果中可以看出,水随着时间在裂隙岩体中扩散,导致电磁波传播穿过介电常数较高的区域时发生强反射而形成的不断变宽的亮带。通过函数拟合,得到当含水饱和度增大时,雷达波反射的瞬时振幅也增大的趋势。结果表明,探地雷达具有探测渗水裂隙的能力,能够对含水饱和度快速变化的渗水裂隙区做出不同的响应,这在石质文物的保护中发挥着重要的作用。研究结果为探地雷达实现超精度探测砂岩体微小渗流裂隙提供了重要的理论支撑。

参考文献

- [1] 黄继忠,王金华,高峰,等. 砂岩类石窟寺保护新进展:以云冈石窟保护研究新成果为例[J]. 东南文化, 2018(1): 15-19.
Huang J Z, Wang J H, Gao F, et al. Recent progresses in sandstone cave temples conservation: a case study of Yungang Grottoes [J]. Southeast Culture, 2018(1): 15-19.(in Chinese)
- [2] 赵勇,曾昭发,李静,等. 地球物理探测技术在石窟寺裂隙渗流中的应用现状及展望[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(2): 928-937.
Zhao Y, Zeng Z F, Li J, et al. Application status and prospect of geophysical detection technology in fracture seepage of grottoes [J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(2): 928-937.(in Chinese)
- [3] Arosio D. Rock fracture characterization with GPR by means of deterministic deconvolution[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 126: 27-34.

- [4] Daniels D J. A review of GPR for landmine detection[J]. *Sensing and Imaging: an International Journal*, 2006, 7(3): 90-123.
- [5] 曾昭发, 刘四新, 王者江, 等. 探地雷达方法原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Zeng Z F, Liu S X, Wang Z J, et al. Principle and application of ground penetrating radar method[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [6] Annan A P, Davis J L, Gendzwill D. Radar sounding in potash mines, Saskatchewan, Canada[J]. *Geophysics*, 1988, 53(12): 1556-1564.
- [7] Zhou L J, Ouyang S, Liao G S, et al. Width estimation of a subsurface water-filled crack using internal multiple reflections from electromagnetic scattering model of a cylinder[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2017, 31(10): 1034-1048.
- [8] Vickers R S, Dolphin L T. A communication on an archaeological radar experiment at Chaco Canyon, New Mexico[J]. *Masca Newsletter*, 1975, 11(1): 6-8.
- [9] Persico R, Ciminale M, Matera L. A new reconfigurable stepped frequency GPR system, possibilities and issues; applications to two different Cultural Heritage Resources[J]. *Near Surface Geophysics*, 2014, 12(6): 793-801.
- [10] 方云, 翟国林, 乔梁. 探地雷达探测技术在奉先寺保护工程中的应用[J]. *物探与化探*, 2014, 38(4): 815-819.
Fang Y, Zhai G L, Qiao L. The application of ground penetrating radar technology to the protection engineering of Fengxian temple[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(4): 815-819.(in Chinese)
- [11] Tsoflias G, Baker M, Becker M. Imaging fracture anisotropic flow channeling using GPR signal amplitude and phase[C]//SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. Society of Exploration Geophysicists, 2013.
- [12] Giertzuch P L, Doetsch J, Jalali M, et al. Time-lapse ground penetrating radar difference reflection imaging of saline tracer flow in fractured rock[J]. *Geophysics*, 2020, 85(3): H25-H37.
- [13] Dong Z J, Feng X, Zhou H Q, et al. Super-resolution detection of millimeter-scale fractures with fluid flow using time-lapse full-polarimetric GPR and anisotropy analysis[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 62: 4500816.
- [14] Eskandari Torbaghan M, Li W D, Metje N, et al. Automated detection of cracks in roads using ground penetrating radar[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 179: 104118.
- [15] Yulianita D, Aisyah R R, Wafi A, et al. Detection of water seepage in lake body using ground penetrating radar method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1876(1): 012012.
- [16] Guo L, Chen J, Lin H. Subsurface lateral preferential flow network revealed by time-lapse ground-penetrating radar in a hillslope[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(12): 9127-9147.
- [17] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Journal of Applied Physics*, 1931, 1(5): 318-333.
- [18] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [19] 方正. 降雨诱发土质滑坡变形预测方法与稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
Fang Z. Deformation prediction method and stability analysis of rainfall induced soil landslide[D]. Changsha: Central South University, 2022. (in Chinese)
- [20] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. *Water Resources Research*, 1980, 16(3): 574-582.
- [21] Minet J, Wahyudi A, Bogaert P, et al. Mapping shallow soil moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 225-237.
- [22] Yee K E. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [23] 王金华, 陈嘉琦. 我国石窟寺保护现状及发展探析[J]. *东南文化*, 2018(1): 6-14, 127-128.
Wang J H, Chen J Q. Current status and future development of cave temples protection in China[J]. *Southeast Culture*, 2018(1): 6-14, 127-128.(in Chinese)

- [24] 王金华, 陈嘉琦, 王乐乐, 等. 我国石窟寺病害及其类型研究[J]. 东南文化, 2022(4): 25-32.
Wang J H, Chen J Q, Wang L L, et al. Deterioration patterns of grotto temples in China[J]. Southeast Culture, 2022(4): 25-32.
(in Chinese)
- [25] 李金文. 大足北山石刻水文地质模型及渗水特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Li J W. Hydrogeological model and seepage characteristics of Dazu Beishan Rock Carvings[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023. (in Chinese)
- [26] 唐申强. 探地雷达瞬时属性分析技术在岩溶涌水通道探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(1): 1-5.
Tang S Q. Application of GPR instantaneous attribute analysis technology in Karst water inrush channel detection[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(1): 1-5. (in Chinese)
- [27] 赵文轲. 探地雷达属性技术及其在考古调查中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Zhao W K. The study of ground penetrating radar attribute technology for archaeological prospection[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [28] Young R A, Deng Z H, Marfurt K J, et al. 3-D dip filtering and coherence applied to GPR data: a study[J]. The Leading Edge, 1997, 16(6): 921-928.
- [29] Sénéchal P, Perroud H, Sénéchal G. Interpretation of reflection attributes in a 3-D GPR survey at Vallée d' Ossau, western Pyrenees, France[J]. Geophysics, 2000, 65(5): 1435-1445.
- [30] 朱沛成. 探地雷达属性分析技术及其在隧道地质预报中的应用研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
Zhu P C. The study of ground penetrating radar attribute analysis technology for tunnel geological prediction[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [31] 徐晨阳. 基于探月雷达数据处理的月球浅表结构研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
Xu C Y. Study on lunar shallow structure based on lunarpenetrating radar data processing[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)
- [32] Zhou H Q, Feng X, Dong Z J, et al. Multiparameter adaptive target classification using full-polarimetric GPR: a novel approach to landmine detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 2592-2606.

(编辑 陈移峰)