

埋地输油管道泄露的正演模拟研究*

杨菊 张玉强

(延安大学物理与电子信息学院 延安 716000)

摘要: 埋地输油管道发生泄露会造成周围土壤和地下水污染,严重威胁人民财产甚至是生命安全。首先研究了埋地输油管道泄露对其周围土壤孔隙度、水饱和度的影响,进而得到污染土壤的介电常数,然后利用计算机模拟不同泄漏情况下管道及其周围土壤的雷达回波,并对管道泄露对雷达回波的影响进行分析,为提高埋地管道及其状况雷达探测数据解释有效性及探测精度提供支撑。

关键词: 探地雷达;输油管道;正演模拟;泄露扩散;介电常数

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on forward modeling of buried oil pipeline leakage

Yang Ju Zhang Yuqiang

(School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China)

Abstract: The leakage of buried oil pipeline will cause pollution of the surrounding soil and groundwater, which will seriously threaten people's property even life safety. This paper first studies the influence of buried oil pipeline leakage on the porosity and water saturation of the surrounding soil, and then obtains the dielectric constant of contaminated soil. Then the radar echo of pipeline and its surrounding soil under different leakage conditions is simulated by computer, and the influence of pipeline leakage on radar echo is analyzed. It provides support for improving the effectiveness of radar detection data interpretation and detection accuracy of buried pipelines and their conditions.

Keywords: ground penetrating radar; oil pipeline; forward simulation; leakage diffusion; dielectric constant

0 引言

埋地管道是目前石油运输的主要方式之一^[1],具有运量大、运输过程平稳、密闭性好等优点。然而,管道在使用过程中,会由于磨损、腐蚀^[2]及地理条件等作用受到损伤,特别是随着管龄增长,发生泄漏的可能性会大大提高^[3]。管道泄漏不仅会造成油品损失,而且会造成水资源和土壤的污染,严重威胁人民财产甚至是生命安全^[4],因此,快速、高效地探测埋地管道状况、发现和定位管道泄漏点对减少财产损失和确保环境安全均具有重要意义。

目前,常用埋地输油管道泄露探测方法有钻井、漏磁检测^[5]、管道机器人检测^[6]、雷达探测等,其中,钻孔行为易引起污染范围扩散,漏磁法检测会导致管壁腐蚀和磨损、管道机器人检测对管道的管径大小和U型管道有较高的要求,而探地雷达是一种无损探测方法,它通过对地下目标进行高频电磁波扫描,并通过回波信号强度、频率、波形、双程走时等反演地下介质的电磁参数及结构分布^[7],最终确定地

下管线状况,具有探测速度快、分辨率高、操作方便灵活、探测费用低等优点。

本文首先研究了埋地输油管道泄露对其周围土壤孔隙度、水饱和度的影响,进一步得到污染土壤的介电常数,然后利用计算机模拟不同泄漏情况下管道及其周围土壤的雷达回波,并对管道泄露对雷达回波的影响进行分析,为提高埋地管道及其状况雷达探测数据解释有效性及探测精度提供支撑。

1 污染土壤的介电常数

雷达探测与探测目标介电常数、电导率等电磁参数紧密相关。由于土壤本身的成分一般非常复杂且为质地不均一、颗粒化的多孔介质^[8],如果发生埋地输油管道泄露,油品就会在管压、重力等作用下会在土壤中迅速扩散迁移,并随着泄露时间的延长,污染范围不断扩大,为典型的多相流驱替的动力学问题。反过来,泄露油品会挤压土壤中原有的空气和水,使污染土壤的各相流体重新分布从而导致油

收稿日期:2021-06-02

* 基金项目:国家自然科学基金项目(61961041)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JM-363)资助

污土壤介电常数、电导率到发生改变,并随着浸入污染物浓度的高低、土壤中含水量的多少以及土壤内部固相颗粒度的大小等因素的不同而存在明显差异,通常需要对土壤样品的土壤颗粒、水、油等的体积含量进行测量并根据一定的模型计算确定。

目前,对于均匀粗质土壤,其介电常数^[9]可以表示为:

$$\epsilon_r = 3.03 + 9.3\theta_w + 146.0\theta_w^2 - 76.7\theta_w^3 \quad (1)$$

对于油污土壤,则常采用修正 Deloor 模型^[9-10] 和 CRIM(the complex refractive index method) 体积混合模型^[10-11]。其中,Deloor 模型可以表示为:

$$\epsilon_m = \frac{3\epsilon_s + 2\theta_w(\epsilon_w - \epsilon_s) + 2\theta_o(\epsilon_o - \epsilon_s) + 2\theta_a(\epsilon_a - \epsilon_s)}{3 + \theta_w(\epsilon_s/\epsilon_w - 1) + \theta_o(\epsilon_s/\epsilon_o - 1) + \theta_a(\epsilon_s/\epsilon_a - 1)} \quad (2)$$

而 CRIM 模型则可以表示为:

$$\sqrt{\epsilon_m} = \theta_s \sqrt{\epsilon_s} + \theta_w \sqrt{\epsilon_w} + \theta_o \sqrt{\epsilon_o} + \theta_a \sqrt{\epsilon_a} \quad (3)$$

当污染土壤中的油品达到饱和状态时,由于水和空气的位置均被油品所占据,因此 Deloor 扩散模型可以进一步简化为:

$$\epsilon_r = \frac{3\epsilon_s + 2\theta_o(\epsilon_o - \epsilon_s)}{3 + \theta_o(\epsilon_s/\epsilon_o - 1)} \quad (4)$$

其中, ϵ_m 、 ϵ_w 、 ϵ_s 、 ϵ_o 、 ϵ_a 分别表示混合土壤、水、土壤颗粒、油和空气的相对介电常数; θ_s 、 θ_w 、 θ_o 、 θ_a 分别表示土壤颗粒、水、油和空气的体积含量,具体取值一般应通过实验测定。

2 模拟计算与分析

模拟实际探测环境,将计算区域分为上下两部分,上面为 0.5 m 的空气,下面为 8.0 m 的以砂土为主要成分的土壤。埋地输油管道位于土壤区域,管道顶部到地面的距离 2.0 m,管径 0.508 m,管壁厚度 0.01 m,圆心坐标为(3.0,5.746),金属材料,管内为不易挥发的柴油,其模型剖面图如图 1 所示。采用 gprMAX 进行仿真,激励源采用中心频率为 300 MHz 的 Ricker 波,时窗 1.4×10^{-7} s,共 72 道数据。雷达从左往右进行探测,步进长度为 0.08 m,发射点与接收点间距 0.08 m。

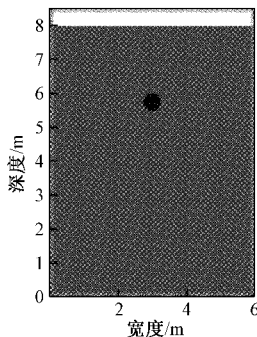


图 1 管道模型剖面图

2.1 未发生泄漏时管道的正演模拟

分别考虑水饱和度保持为 0.43 不变而土壤的孔隙度

为 0.30、0.45、0.60、0.75 和孔隙度保持为 0.45 不变而水饱和度和度同样为 0.30、0.45、0.60 和 0.75 两种情况下单通道和 B-SCAN 的雷达回波信号(计算模型如图 1 所示)。其中,计算区域下方土壤的介电常数随土壤水饱和度、孔隙度的变化可由式(1)求得,具体取值如图 2 所示。分别进行单通道雷达回波和 B-SCAN 雷达回波仿真计算,其中,单通道回波计算中发射和接收天线分别位于 2.746 m 处和 3.254 m 处,计算结果如图 3 所示,而 B-SCAN 回波计算从 0.08 m 到 5.76 m、步长为 0.08 m,计算结果如图 4 和 5 所示。

如图 2 所示,土壤介电常数随着土壤孔隙度、水饱和度的增大而增大。土壤孔隙度与水饱和度的乘积表示水体积分数,即随着水体积分数的增大,介电常数也增大。这是因为,通常情况下水具有较大的介电常数,土壤孔隙被水填充后,其介电常数会显著增大,从而导致整个探测范围内的介电常数变高。

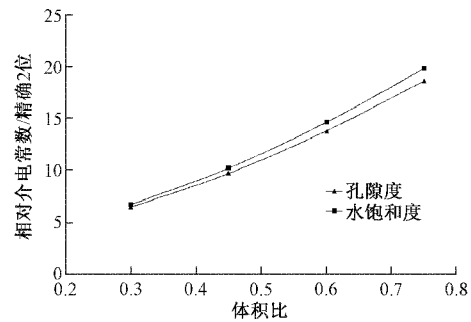
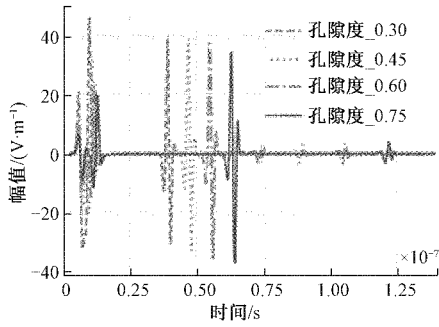


图 2 相对介电常数随土壤孔隙度、水饱和度变化

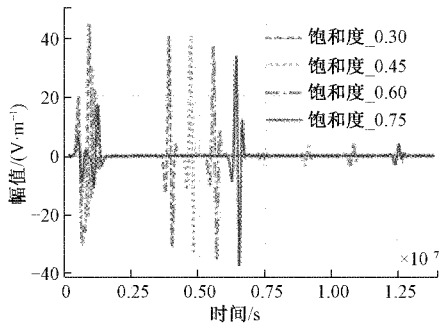
如图 3 所示,存在明显的 3 处脉冲信号。第 1 组在 0.01 ns 左右,表示天线发射脉冲遇到地表反射的信号,能量幅值分别为 40、30、21 和 19 V/m 左右,这是因为不同水体积分数的土壤介电常数的差异会导致发射的电磁波在地表反射所消耗的能量不同,介电常数越小,消耗的能量越多,回波幅值将会越大,反之幅值就越小。第 2 组在 0.025~0.07 ns 之间,表示埋深 2 m 金属管道的反射信号,幅值均在 40 V/m 左右,没有衰减反而存在增强的现象,同时信号与地表反射信号存在相位差,且不同土壤条件下的信号存在时延。幅值增强原因在于金属材质的管道电导率无穷大,对信号有增强的作用。信号发生时延是因为在埋深一致的情况下,介电常数越大,传播速度就越小,则出现回波的时间越晚,反之出现时间会越早。第 3 组脉冲在 0.07~0.14 ns 之间,信号幅值均很小且存在时延,由于电磁波信号无法穿透金属介质^[12],而在金属管道回波之后出现的回波信号与金属管道信号又存在相位差,则该信号为地面反射波,并且在地下介质损耗下使电磁信号变得很弱。

由于地面直达波很大程度的影响了目标物体回波信号特征的分析,因此,本文采用均值滤波法对反射信号回波数据进行处理,以消除背景干扰并相对增强目标特征信息。

如图 4 和 5 所示,分别为去除直达波的不同孔隙度和不



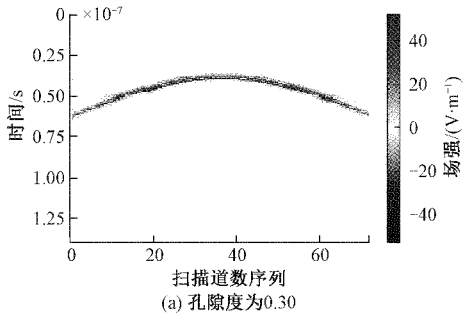
(a) 不同孔隙度单波道数据集合图



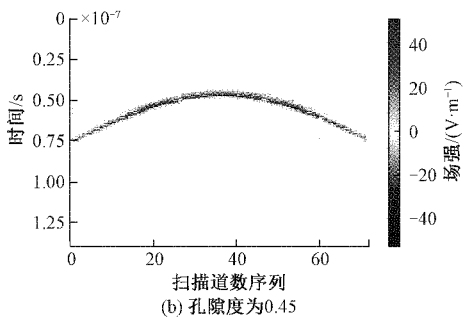
(b) 不同水饱和度单波道数据集合图

图 3 未污染的不同孔隙度和不同含水量土壤的管道单波道数据集合图

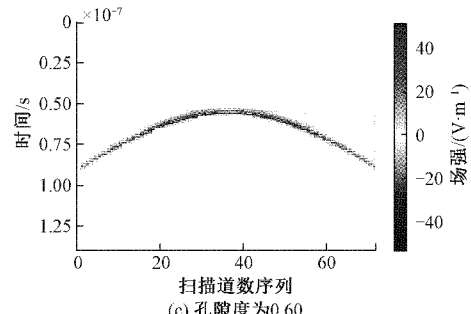
同水饱和度的管道 B-Scan 图,可以看出两点:1)在 0.025~0.07 ns 之间,由于各测点到管道的实际距离是固定的,随着含水体积分数的增加,土壤介电常数增大,雷达波传播速度降低,其从测点到管道的双程走时相应增大,即出现管道反射波曲线的位置逐渐向下平移的现象。2)随着含水体积分数的增加,管道的反射双曲线逐渐变尖,即其离心率逐渐变小。从整个剖面图可以看出,回波信号同相轴连续,波形稳定且振幅和相位一致性好。



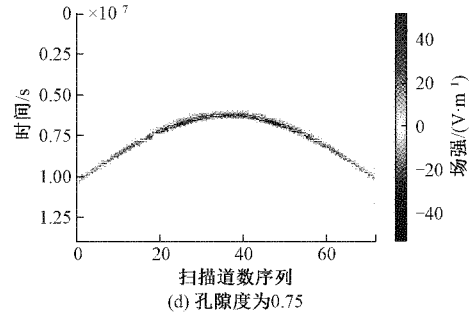
(a) 孔隙度为0.30



(b) 孔隙度为0.45

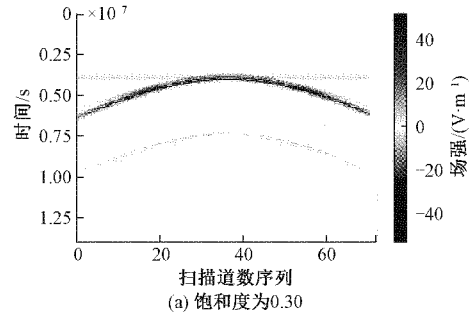


(c) 孔隙度为0.60

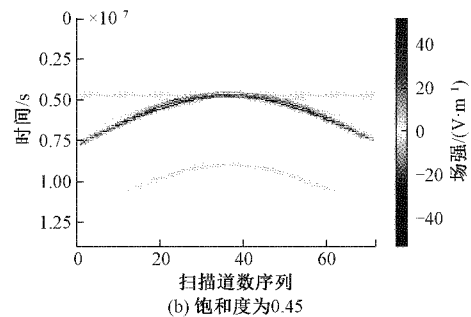


(d) 孔隙度为0.75

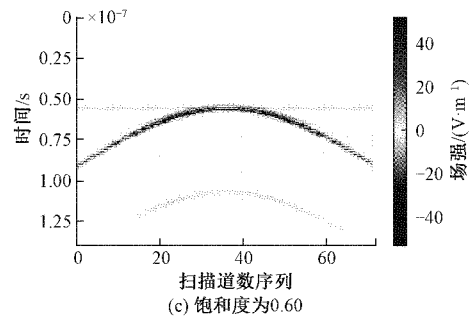
图 4 不同土壤孔隙度的管道 B-Scan 图



(a) 饱和度为0.30



(b) 饱和度为0.45



(c) 饱和度为0.60

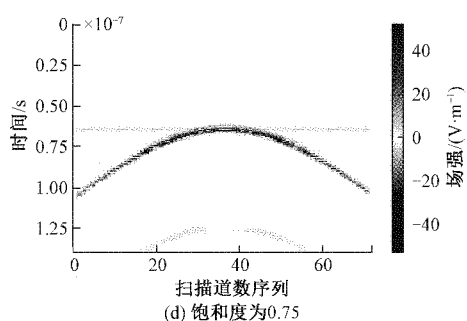


图 5 不同水饱和度土壤的管道 B-Scan 图

2.2 管道泄露扩散正演模拟

当管道下方存在 10 mm 的孔径,在管压为 3 MPa,泄露初速度为 10 m/s 情况下发生泄露时,柴油渗流区在管壁影响下最终会以近似于圆的形状分布^[13-14],选择短时间内扩散范围一致的情况作为研究对象,忽略泄露边缘的细微变化,扩散范围为直径 5.5 m 的圆,圆心坐标为(3, 5.192),污染剖面图如图 6 所示,管道周围的圆形就是被柴油所污染的部分,该部分相对介电常数可利用式(4)计算得出,其中砂土骨架和柴油的相对介电常数分别为 4 和 2.47,即在与上文一致的不同水饱和度和不同孔隙度条件下相对介电常数具体如图 7 所示,其他的雷达天线位置设置等参数与上文一致,则在发生泄露污染土壤的不同孔隙度和水饱和度情况下的单波道数据集合图和 B-Scan 图分别如图 8~10 所示。

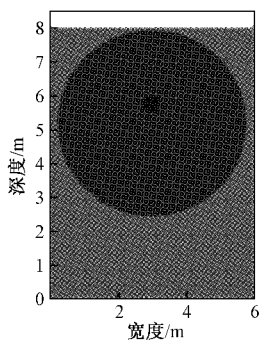


图 6 管道泄露扩散剖面图

如图 7 所示,被污染区域的相对介电常数在随着孔隙度增大的情况下有所降低,但当孔隙度不变时,被污染土壤的介电常数也不变。这是因为泄露油的介电常数要比土壤的介电常数小,土壤孔隙度具有一定的储油能力^[15],因此,当孔隙度的油越多时,该部分的介电常数也会越低。

如图 8 所示,存在 1 处明显的脉冲信号和 3 处微弱的脉冲信号。第 1 组在 0.01 ns 左右,表示天线发射脉冲遇到地表反射的信号,能量幅值均高达近 400 V/m。第 2 组在 0.02 ns 左右,表示污染区域的信号,能量幅值减弱很多,时延相差不大。原因在于污染区域介电常数与周围环境的介电常数相差不大,因此该部分单波道数据响应就会很弱,同

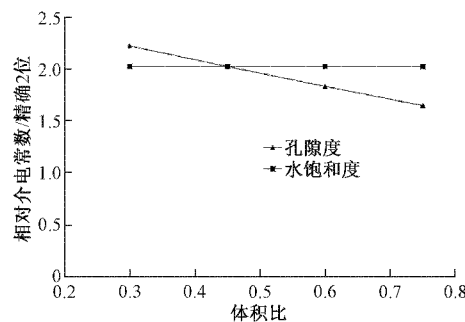
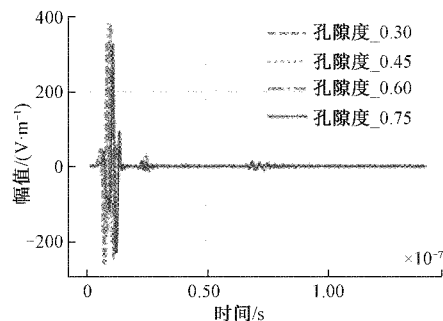
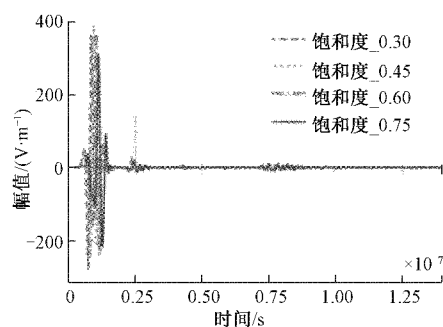


图 7 相对介电常数随土壤孔隙度、水饱和度变化

时发现被污染部分介电常数相差不大,故时延相差不大。第 3 组在 0.04 ns 左右,表示管道的信号,第 4 组在 0.06~0.1 ns,表示二次地面回波信号,这两组信号能量较第 2 组减弱很多,这是因为在污染区域能量衰减很大,导致到管道的反射信号强度减弱,继而深度越深,信号强度越弱。与图 3 相比,发现相同环境下,被污染土壤的单波道数据在 0.06~0.1 ns 范围内出现很多能量很低的反射信号。



(a) 不同孔隙度单波道数据集合图



(b) 不同水饱和度单波道数据集合图

图 8 不同土壤孔隙度和含水率的管道泄露扩散的单波道数据集合图

如图 9 和 10 所示,分别为去除直达波的不同孔隙度和不同水饱和度的管道泄露扩散 B-Scan 图,可以看出两点: 1) 在 0.02 ns 左右,由于各测点到污染区域的实际距离是一样的,随着含水体积分数的增加,管道的反射双曲线逐渐变尖,即其离心率逐渐变小。2) 在 0.06~0.125 ns 之间,出现的波形能量很低,且出现波形不连续的现象。与图 4 和 5 相比,整个剖面图上出现大面积杂乱的叠波,回波同相

轴不连续,振幅和相位一致性较差,波形虽然不如未发生泄露时的回波图那样清晰,但仍然可以追踪。

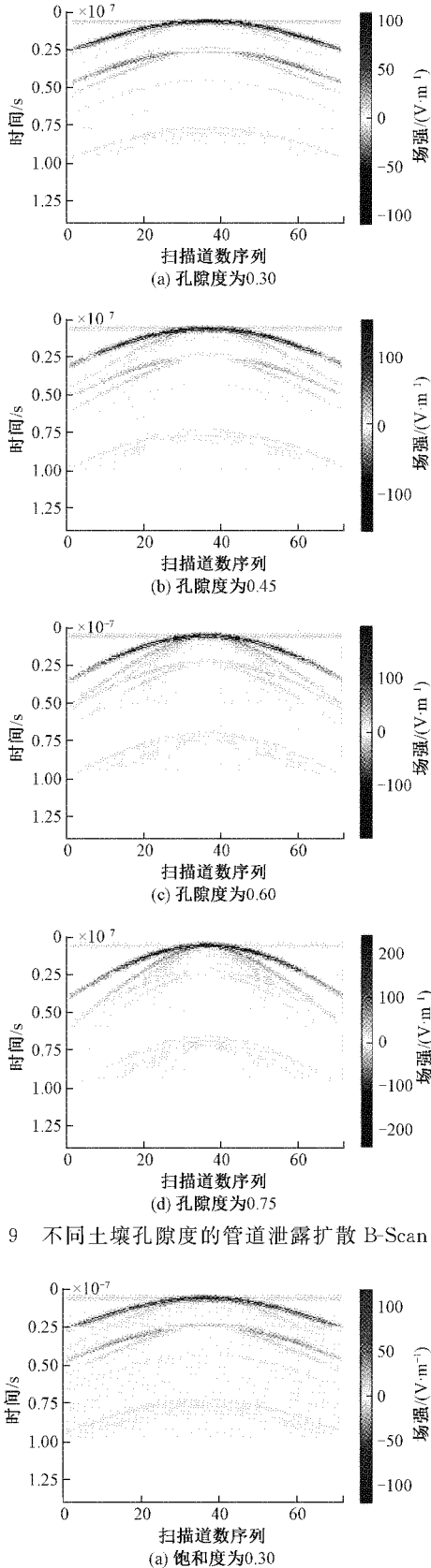


图 9 不同土壤孔隙度的管道泄露扩散 B-Scan 图

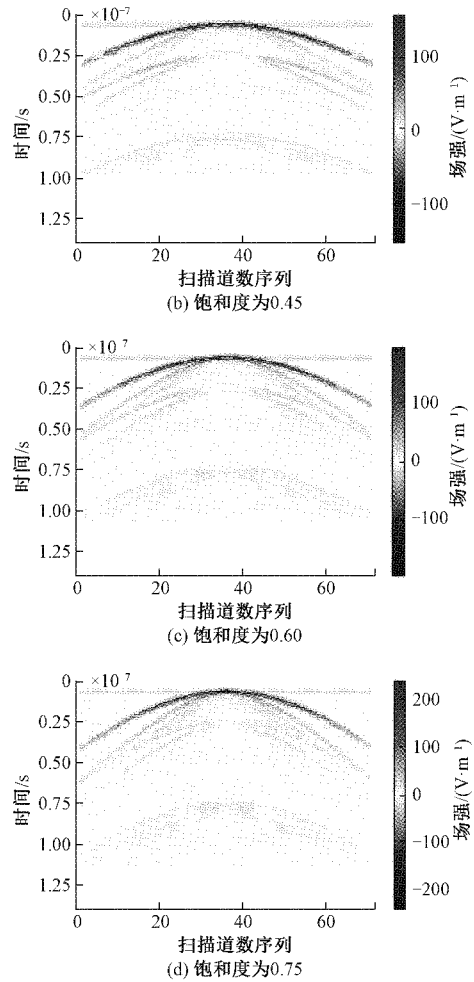


图 10 不同水饱和度土壤管道泄露扩散 B-Scan 图

3 结 论

埋地输油管道泄漏检测对减少财产损失和确保环境安全均具有重要意义,然而,由于受地理环境、管道质量等多种因素影响,也是一项非常复杂的问题。本文对埋地输油管道发生泄漏和未发生泄露两种情况进行了数值模拟,并对两种情况下雷达的回波信号进行了对比分析,发现输油管道泄漏会造成雷达回波信号发生较大变化,主要表现为会出现大面积的无规则回波,并且该回波呈现出间断甚至断开的现象,以此判断泄露点及泄露区域范围,该结果对埋地输油管道泄露实测雷达图像的解读具有指导意义。

参考文献

- [1] 王保群. 我国输油管道之最[J]. 石油知识, 2014(5): 22-23.
- [2] 刘保余, 邹檀, 闫朔, 等. 原油管道内腐蚀检测技术研究[J]. 管道技术与设备, 2021(2): 33-36, 46.
- [3] 魏明明. 直埋输油管道泄漏扩散数值模拟研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2017.
- [4] 李健, 陈世利, 黄新敬, 等. 长输油气管道泄漏监测与准

- 实时检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1747-1760.
- [5] 王学彬, 王黎明, 吴博, 等. 管道三维漏磁检测仿真分析及研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(8): 29-33.
- [6] 郎宪明, 李平, 曹江涛, 等. 长输油气管道泄漏检测与定位技术研究进展[J]. 控制工程, 2018, 25(4): 621-629.
- [7] 戴沁楠, 周斌, 钟景阳, 等. 基于超宽带步进频 GPR 和 EMI 的钢筋检测[J]. 电子测量技术, 2021, 44(5): 34-40.
- [8] 张颖, 行鸿彦, 张旭, 等. 土壤水分传感器探头的仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 55-65.
- [9] 李晔, 鹿琪, 刘财. LNAPLs 迁移的数值模拟和土壤介电性质的变化分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(2): 936-943.
- [10] 李洪丽, 鹿琪, 冯珉, 等. LNAPL 污染土壤介电性质的实验研究——以石英砂为例[J]. 世界地质, 2012, 31(2): 426-432, 440.
- [11] 董泽君, 鹿琪, 冯珉, 等. 探地雷达测量土壤含水量的应用研究[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2207-2213.
- [12] 刘颖, 郭立新. 地下埋藏目标与分层粗糙面复合散射探地雷达回波特性研究[J]. 电波科学学报, 2019, 34(1): 111-118.
- [13] 符泽第. 埋地成品油管道小孔泄漏扩散的数值仿真模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [14] 吴国忠, 王迪, 赵文浩, 等. 埋地输油管道泄漏污染物地表运移特征[J]. 化工学报, 2017, 68(S1): 111-116.
- [15] 王琨, 周航宇, 赖杰, 等. 核磁共振技术在岩石物理与孔隙结构表征中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 101-114.

作者简介

杨菊, 硕士研究生, 主要研究方向为地下目标信息获取、处理和识别。

E-mail: yangju1028@163.com

张玉强(通信作者), 教授, 博士, 主要研究方向为目标特性分析与识别。

E-mail: yau_zyq@yau.edu.cn