

煤炭科学研究总院 编

煤炭科学研究总院

青年优秀科技论文集

煤炭工业出版社

中国科学出版社

青年优秀科技论文集

中国科学出版社

煤炭科学研究总院 青年优秀科技论文集

煤炭科学研究总院 编

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

煤炭科学研究总院青年优秀科技论文集/煤炭科学研究总院编. —北京: 煤炭工业出版社, 2003

ISBN 7-5020-2382-8

I. 煤… II. 煤… III. 矿业工程—文集
IV. TD-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 106020 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850\text{mm} \times 1168\text{mm}^{1/32}$ 印张 $12\frac{1}{8}$

字数 318 千字 印数 1—700

2003 年 12 月第 1 版 2003 年 12 月第 1 次印刷

社内编号 5153 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

编 者 的 话

为提高青年科技人员的技术业务水平和工作能力，鼓励青年职工努力探索、大胆开拓，在工作实践中不断提高学术、理论水平，在总院党委的领导下，总院团委组织在京单位开展了青年优秀科技论文评选活动。活动得到广大团员青年的积极响应和参与，共有 55 篇论文参加了评选。根据专业不同，经专家评审组评审后，共评出一等奖 5 篇，二等奖 11 篇，三等奖 14 篇，鼓励奖 10 篇。为交流获奖的优秀论文，促进总院青年科技人员不断提高学术水平，特将这些优秀论文编辑成集出版。

本次获奖的论文，无论在选题、立论、计算和理论分析方面，都有许多给人以启发的亮点，展示了青年科技人员结合工作实践努力钻研理论问题所取得的可喜成绩。但也存在一些问题，特别是有的论文表述不够规范、文字不够精练，篇幅过长等，有待进一步提高。

在这次活动中，总院王金华院长、李延江书记、李华副书记给予了悉心指导，总院科技发展部给予了大力支持和帮助，专家评审组的专家对参评论文进行了认真评审，充分体现了对青年人成长成才的关心。在此，致以真诚的谢意。

总院团委

2003 年 11 月

目 录

采矿与支护工程

有耗介质高频脉冲电磁波传播衰减理论

与应用研究..... 孙洪星 (3)

我国巷道围岩地质力学测试技术的新

进展..... 林 健 (13)

综放开采支架阻力不惟一性原因分析..... 毛德兵 (23)

承压水开采引起地面沉降的数学模型..... 张刚艳 (30)

基于神经网络的上隅角瓦斯浓度预测

及其处理方法的优选研究..... 刘见中 (39)

液压支架千斤顶参数化设计研究..... 华 辉 (48)

一种新型合成液压支架用液压液..... 张立群 (55)

微乳液及其应用..... 许海霞 (62)

岩土与材料工程

防水混凝土在冻结井壁中的应用研究..... 李长忠 (77)

冻融对土工参数影响的试验研究..... 罗小刚 (90)

现浇混凝土楼板的粘碳纤维布加固技术..... 肖 毅 (97)

防裂密实混凝土的性能及工程应用 张斗群 (108)

人工地层冻结的环境效应及其工程对策 李方政 (114)

水泥-粉煤灰浆液的试验及其应用 雷 风 (123)

自燃煤矸石泡沫轻集料混凝土及配方

设计 黄爱悦 (127)

非饱和粉质粘土抗剪强度的非线性研究 刘晓敏 (135)

应用振冲双液注浆加固技术控制基坑

- 开挖引起的下部隧道局部位移 杨春满 (144)

洁净煤与环境工程

流动注射-氢化物发生-原子吸收

- 光谱法测定煤中砷 皮中原 (151)
- 煤直接液化残渣焦化特性研究 陈明波 (161)
- 碳化法生产白炭黑工艺研究及反应
- 动力学分析 涂 华 (172)
- 造纸黑液制取水煤浆添加剂的研究 白成志 (183)
- 京西无烟煤固定床气化特性研究 纪任山等 (191)
- 利用 XRD 研究中低变质程度煤显微
- 组分的大分子结构 罗隽飞 (200)
- 三氯乙酰氯的分离提纯研究 张小舟等 (213)
- 2002 年全国水煤浆生产和应用情况及
- 市场前景分析 刘 珊 (223)
- 煤焦水蒸气气化反应动力学研究 文 芳 (234)
- 用絮凝剂处理制革废水的比较研究 王世超 (243)

自动化与仪器仪表

- YM-1A 型数字压力表的设计与实现 刘亮平 (255)
- SHJ-40 型检测仪在实际操作中的使用 邓 昀 (261)
- 煤矿列车煤量自动增补系统研制 席启明等 (272)
- JSS30A 型数显收敛计的研制 安明亮 (280)
- 具有弹性基础减速器的直流提升机电气
- 消振方法研究 刘竞雄等 (285)
- 煤矿网络化管理系统在中小煤矿安全
- 监控管理中的应用 周志平 (292)

ASP.NET 图形技术在企业信息平台

建设中的应用 韩 冰 (312)

经济管理 与 软科学

论市场经济条件下的企业人才培养

和市场营销 冯大任 (321)

煤炭企业实施职业安全健康管理体系

探讨 高 峰 (329)

面对挑战, 抓住机遇, 创科技期刊新

发展 韩晋平 (339)

上市公司收益质量分析 孙春升 (347)

知识管理——企业竞争的优势 郝 妮 (355)

《煤炭科学技术》2000~2002 年载文

统计分析 李军涛 (361)

煤科总院企业形象建设探析 索 琳 (369)

采矿与支护工程

有耗介质高频脉冲电磁波传播衰减理论与应用研究

开采所 孙洪星

地质雷达是一种通过发射、接收高频率、窄脉冲宽频段电磁波 (10MHz~1GHz), 并根据接收到的电磁波的振幅、波形、双程旅行时以及频率等运动学和动力学特征来确定和推断地下介质结构、地层岩性特征的一种地球物理探测技术。由于地质雷达发射的电磁波的频率高, 其探测精度和分辨能力是所有地球物理探测方法中最高的, 可达厘米级和毫米级。

同传统的探空雷达不同, 地质雷达是在地下有耗介质中传播的, 所以存在着高频衰减。雷达高频脉冲电磁波在地下有耗介质中传播过程中产生的衰减现象, 一般认为是由于电导率、介电弛豫性质和磁弛豫性质等多种因素引起的^[1]; 电能衰减和磁能衰减的机理是相似的, 其中由介质导电效应而引起的介质层间衰减影响最大^[2]。一般来讲, 地质雷达多在非磁导介质中开展工作, 所以研究中一般可以忽略磁导介质电磁波衰减的影响。据前人的研究, 由介质的介电弛豫性质引起的电磁波衰减中的电能损失量中的松弛因子可以描述为位移量与电场强度矢量的褶积关系^[3], 其中介电常数为复数, 并依赖于频率的大小。

本文在研究和分析地质雷达高频脉冲电磁波在地下有耗介质传播过程中衰减特性理论的基础上, 将其应用于因受外力影响和工农业超度抽水引起的地下裂缝、空洞化等弱地基工程勘察实践。实践证明, 采用高频脉冲电磁波的地质雷达探测技术具有投资少、见效快、探测精度高等优点, 尤其适合大型基础治理、地质灾害治理等工程, 具有很好的推广应用前景。

1 有耗介质中高频电磁波传播麦克斯韦方程

高频电磁波的传播可以用一组麦克斯韦方程来表示, 考虑高频电磁波在地下有耗介质中传播时电能损失和介电弛豫特性, 有以下表达式:

$$\left. \begin{aligned} \nabla E &= \frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla H &= J_s + \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} \\ B &= \mu H \\ D &= \epsilon_0 \epsilon_\infty \sum_{l=1}^L \Phi_l(t - \tau) E(\tau) d\tau \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E 为电场强度矢量, B 为磁场强度矢量, D 为位移电流矢量, H 为磁场密度矢量, J_s 为电流密度矢量 (无源时 $J_s = 0$), Φ_l 是衰减函数, 类似于粘弹性介质中的响应函数, ϵ_0 为真空中的介电常数 ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m), ϵ_∞ 为高频条件下相对介电常数, σ 为电导率。由于描述电磁波衰减的函数不只一个, 所以考虑用 L 来表示衰减特性的衰减函数的个数, 如果考虑磁导效应对电磁波能量的衰减的影响, 则 $B = \mu H$ 可以表示为:

$$B = \mu_0 \mu_\infty H + \sum_{l=1}^L \int_{-\infty}^t \Phi'_l(t - \tau) H(\tau) d\tau \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率, μ_∞ 为高频下的磁导率, Φ'_l 为磁衰减函数。一般来讲, 磁导弛豫松弛效应产生的磁能损失同电能损失相比较小, 且地质雷达多在非磁导介质中工作, 故磁导松弛效应产生的磁能损失量一般可以忽略不计。

从以上的分析可以看出, 求解麦克斯韦方程的关键是确定衰减函数 Φ'_l , 目前的研究中, 表征 Φ'_l 衰减函数的方法很多, 根据前人的研究^[1], 通过引进一个叫德贝尔函数的关系式来表示衰减因子, 德贝尔函数可以用下式表示:

$$\Phi_l(t) = \epsilon_0 \frac{\epsilon_s^l - \epsilon_\infty}{\epsilon_l} e^{\frac{t}{\tau_l^l}} \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

式中: τ_l 为松弛时间, ϵ_s^l 为低频条件下相对介电常数, L 为衰减函数的总个数。

由以上的分析可以看出, 影响电磁波传播的参数包括 μ 、 σ 、 ϵ_0 、 τ_l 、 ϵ_s^l 和 ϵ_∞ 等, 通常可以采用 μ 、 σ 、 τ_l 和 ϵ_s^l 和 ϵ_∞ 来描述电磁波衰减特性。对于地质雷达探测来说, μ 、 σ 、 ϵ_0 和 ϵ_∞ 是已知的或可以通过试验进行测定, 而 τ_l 和 ϵ_s^l 则可以通过优化反演算法如模拟淬火优化反演和遗传算法来拟合求得^[3]。

2 有耗介质中高频电磁波传播衰减特性数学模型

在电磁波传播理论中, 通常可以采用 3 个参数来描述有耗介质的衰减行为, 即复介电常数、品质因子和衰减系数。需进一步指出的是, 这 3 个参数不是独立的, 而是从不同的角度来描述电磁波的衰减特性, 从这个角度上讲, 它们是等价的。

(1) 复介电常数 $\epsilon^*(\omega)$ 。在有耗介质中, 如果考虑衰减和频散效应, 复介电常数 $\epsilon^*(\omega)$ 可以表示为:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_\infty + j\sigma/\omega + \zeta_0 \sum_{l=1}^L \frac{\epsilon_s^l - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_l} \quad (4)$$

式中: τ_l 为第 l 个衰减因子的松弛时间。

在电磁波衰减特性的研究中, 复介电常数不如其他两个参数常用^[4], 如果研究单色频率电磁波传播理论, 复介电常数应用则较多。

(2) 品质因子 Q 。品质因子是表征高频雷达脉冲电磁波衰减特性的一个重要物理参数 Q , Q 值可以被定义为系统内储能与耗散能的比率^[4]

$$Q^{-1} = \frac{1}{2} \pi \frac{\Delta E}{E} = \tan \delta \quad (5)$$

式中: ΔE 为耗散能, E 为系统内储能, δ 为电能损失量。从上式中可以看出, Q 越小, 高频电磁波的耗能就越大, 从而介质的损耗和不均匀性就越大。品质因子还可以进一步表示为:

$$Q^{-1}(\omega) = \tan \delta = \frac{I_m [\epsilon^*(\omega)]}{R_m [\epsilon^*(\omega)]} \quad (6)$$

参考 (4) 式, 上式还可以进一步写成:

$$Q^{-1}(\omega) = \frac{\sum_{l=1}^L \frac{\omega \tau_l (\epsilon_s^l - \epsilon_\infty)}{1 + (\omega^2 \tau_l^2)} + \frac{\tau}{\epsilon_0 \omega}}{\epsilon_\infty + \sum_{l=1}^L \frac{\omega \tau_l (\epsilon_s^l - \epsilon_\infty)}{1 + (\omega^2 \tau_l^2)}} \quad (7)$$

从上式中可以看出品质因子与频率及松弛时间等参数的定量关系。在地质雷达波高频、宽频带范围内, 不同的岩石和不同的频带范围呈现不同的衰减特性。目前对品质因子 Q 多是在实验室对岩石试件进行试验测定来获得的, 也可以在现场通过原位测定。

目前, 在对品质因子描述高频电磁波衰减特性的研究中, τ_l 和 ϵ_s^l 和 ϵ_∞ 是比较难确定的项, 由于对衰减特性机制认识尚不统一, 因此用来描述 Q 参数的模型很多, 但大多数模型都是在一定范围内适应, 并不是通用的。而复介电常数作为一个与频率有关的函数则是容易分析和测定的。所以在研究有耗介质的衰减特性时, 引用 Cole-Cole 公式来描述复介电常数和品质因子, 以减少不确定的物理学参数, 这样 (4)、(7) 就简化为:

$$\epsilon^*(\omega) = \epsilon_0 \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 (\epsilon_l - \epsilon_\infty)}{1 + (j\omega/\omega_\epsilon)^{\alpha_\epsilon}} \quad (8)$$

$$Q^{-1}(\omega) = \left[\frac{(\epsilon_l - \epsilon_\infty)(\omega/\omega_\epsilon)^{\alpha_\epsilon} \cos \frac{1}{2}(1 - \alpha_\epsilon)\pi}{1 + 2(\omega/\omega_\epsilon)^{\alpha_\epsilon} \sin \frac{1}{2}(1 - \alpha_\epsilon)\pi + (\omega/\omega_\epsilon)^{2\alpha_\epsilon}} + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right] \times \left[\frac{(\epsilon_l - \epsilon_\infty)(\omega/\omega_\epsilon)^{\alpha_\epsilon} \left[1 + \sin \frac{1}{2}(1 - \alpha_\epsilon)\pi \right]}{\epsilon_\infty \left[1 + 2(\omega/\omega_\epsilon)^{\alpha_\epsilon} \sin \frac{1}{2}(1 - \alpha_\epsilon)\pi + (\omega/\omega_\epsilon)^{2\alpha_\epsilon} \right]} \right]^{-1} \quad (9)$$

式中: ω_ϵ 为测定的松弛频率, α_ϵ 为松弛权系数, $0 \leq \alpha_\epsilon \leq 1$; ϵ_l 、 ϵ_∞ 分别为低频和高频条件下测定的相对介电常数; 这样仅用四个参数 ω_ϵ 、 α_ϵ 、 ϵ_l 、 ϵ_∞ 就完全可以描述复介电常数和品质因子。实践证明, 采用 Cole-Cole 公式对高频电磁波的衰减特性

进行描述相对简单, 而且能比较准确地描述大多数岩土、矿石的衰减行为, 应用比较广泛, 效果很好。采用德贝尔函数和采用 Cole-Cole 公式对品质因子 $Q(\omega)$ 的评价是等价的, 根据前人的研究, 两者拟合的结果通常是一致的, 图 1 和表 1 是两者拟合情况及采用的参数。

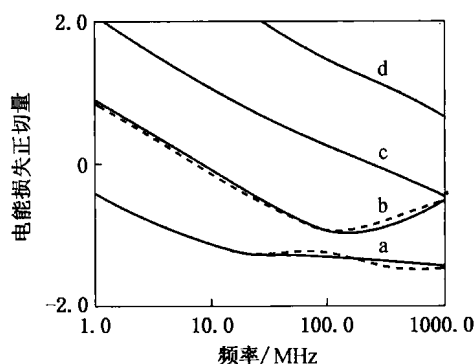


图 1 采用 Cole-Cole 公式和采用德贝尔函数
对品质因子 $Q(\omega)$ 的拟合情况
(实线为 Cole-Cole 公式描述; 虚线为德贝尔函数描述)

表 1 图 1 拟合所采用的参数 C

曲线	ϵ_l	ϵ_∞	ω_c/Hz	α_ϵ	$\sigma/(\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$
a	3.46	2.65	7.5×10^7	0.38	1.00×10^{-5}
b	14.60	7.00	1.5×10^9	1.00	1.00×10^{-3}
c	43.04	20.73	1.1×10^8	0.70	4.25×10^{-2}
d	9.00	4.50	2.0×10^8	0.88	2.00×10^{-1}

(3) 衰减系数 $\alpha(\omega)$ 。衰减系数 $\alpha(\omega)$ 是描述电磁波衰减特性的另一个重要参数, 根据 Von Hippel (1962) 的研究, 衰减系数可以表示为:

$$\alpha(\omega) = \frac{\omega}{\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_r}{C_0} R_e[\epsilon^*(\omega)] \cdot \sqrt{1 + \Omega^{-1}(\omega)} - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中： C_0 为真空中的光速， μ_r 为相对磁导率。

3 有耗介质高频地质雷达脉冲电磁波衰减特性应用

以上分析了高频脉冲电磁波在有耗介质中的衰减行为的数学描述，实际应用中常应用于对地质雷达探测数据的分析和解释，通过对地质雷达资料中雷达反射波衰减特性的研究和分析来推断地下介质的特性和岩性结构，进而解决有关工程地质问题。近几年来，将该研究成果应用于弱地基地质雷达探测结果的分析，取得了良好的效果。

弱地基主要包括由于受外力如露天矿开采、深部井工开采、边坡、断层活化以及工农业过渡抽水引起的浅部第四系土体和基岩体（主要是第四系土体）深度变形和亲水土体的流失导致的地下裂缝、裂隙以及空化造成的地基弱化，如不对其进行处理，将对地表建（构）筑物造成严重威胁直至破坏。治理前需对其位置进行准确定位并其发育程度和展布范围进行定量评价。通过近几年来对弱地基地质雷达波衰减特性的研究和应用地质雷达探测技术探测近地表弱地基的实践，弱地基在地质雷达时间剖面上的特征通常表现为：

(1) 雷达反射波同相轴明显错动。断裂破碎带及大的空洞化裂缝、裂隙造成正常地层发生突变，两侧地层性质发生变化，表现在地质雷达时间剖面上为反映地下地层界面的雷达反射波同相轴明显错动，断层和地裂缝越大，这一特征越明显。

(2) 雷达反射波同相轴局部缺失。断裂破碎带破碎程度与范围，地下裂缝、裂隙和空洞化发育情况和程度往往是不均衡的，如果地下裂缝、裂隙沿横向发展、发育，那么由于其对雷达反射波的吸收和衰减作用，往往使得在裂缝、裂隙的发育位置造成可连续追踪对比的雷达反射波同相轴局部缺失，而缺失的范围与地下裂缝、裂隙的横向发育范围和大小有关。

(3) 雷达反射波波形发生畸变。断裂破碎带, 地下裂缝、裂隙等在地质雷达时间剖面上的另一表现特征为, 由于破碎带, 地下裂缝、裂隙对雷达子波的电磁弛豫效应和衰减、吸收造成雷达反射波在局部发生波形畸变, 畸变程度与破碎带程度和地下裂缝、裂隙的规模有关。

(4) 雷达反射波频率发生变化。由于破碎带, 地下裂缝、裂隙对雷达子波的电磁弛豫效应和衰减、吸收作用, 往往对雷达波波形改造的同时造成雷达反射波在局部频率降低, 这也是在地质雷达时间剖面上识别断裂破碎带、地下裂缝、裂隙的一个重要标志。

(5) 出现断面波、绕射波。对于比较大的断裂, 由于断裂面的存在, 在地质雷达时间剖面上有时产生明显的断面波和绕射波, 断面波发育程度与断层发育程度和波长大小有关。

上述弱地基在地质雷达时间剖面上特征往往不是孤立的, 即有时几种特征同时存在, 有时有的特征更突出, 而有的特征则表现的不明显, 这就需要资料解释人员除对区域地质条件充分了解以外, 还必须具有丰富的实践和解释经验, 从而去伪存真, 得到更准确的地下地质信息。

4 弱地基地质雷达探测应用实例与效果

几年来, 采用地质雷达探测技术对长江三峡和抚顺石油一厂等地区弱地基开展了地质雷达探测工作取得了良好的效果, 从而为地基加固和地基灾害治理提供了直接和可靠的依据。

4.1 浅部断裂破碎带地质雷达探测实例与效果

图 2 是利用地质雷达探测方法采用 100MHz 雷达天线在抚顺某厂区附近进行探测获得的地质雷达时间剖面图, 从图中可以看出, 在该测线 41~53m 处反映基岩界面的地质雷达反射波发生中断, 变得不可追踪, 基岩岩体内由于介质的不均匀性对雷达波的衰减导致雷达反射波的波形产生畸变和雷达反射波的频率降低, 分析认为, 间断的雷达反射波是由于断层破碎带内压碎和挤