



不同煤矸混合物的微波传播特性试验研究

司垒 李嘉豪 邢峰 魏东 戴剑博 王忠宾

引用本文:

司垒, 李嘉豪, 邢峰, 等. 不同煤矸混合物的微波传播特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 219–231.

SI Lei, LI Jiahao, XING Feng. Experimental study on microwave propagation characteristics of different coal–gangue mixtures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 219–231.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0206>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多组分气体混合物在煤的孔隙中运动特性研究

Study on transport characteristics of multi-component gaseous mixtures through coal pore

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a14e2bfd-d4c3-4574-aa27-5a0089276ace>

面向煤矸分拣机器人的煤矸识别定位系统研究

Research on coal gangue identification and positioning system based on coal–gangue sorting robot

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 237–246 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/44286d3f-7340-456c-a4fb-cb6e4fc67aea>

基于多机械臂协同的煤矸分拣方法研究

Study on coal–gangue sorting method based on multi-manipulator collaboration

煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ad9126cf-28fa-4d74-86a6-76a3fbe935ee>

基于几何特征约束的煤矸DE–XRT精准识别方法

Accurate identification method of coal and gangue based on geometric feature constraints by DE–XRT

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 262–275 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1276>

外在水分对煤矸图像特征影响的试验研究

Experimental study on influence of external moisture on image features of coal and gangue

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 179–187 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/de36cdef-9686-4b11-b7e4-2585b612253b>

多因素光照条件下高质量煤矸图像获取方法研究

Research on method of acquiring high quality coal gangue images under multi-factor illumination condition

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 455–463 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0656>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

机电与智能化



移动扫码阅读

司 垒, 李嘉豪, 邢 峰, 等. 不同煤矸混合物的微波传播特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 219–231.

SI Lei, LI Jiahao, XING Feng, *et al.* Experimental study on microwave propagation characteristics of different coal-gangue mixtures[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(5): 219–231.

不同煤矸混合物的微波传播特性试验研究

司 垒, 李嘉豪, 邢 峰, 魏 东, 戴剑博, 王忠宾

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 煤矸识别问题是煤炭行业内长期未能有效解决的技术难题之一。通过分析现有煤矸识别方法的特点及局限性, 探讨基于微波探测技术进行煤矸识别的可行性。首先, 开展了对不同煤种和矸石的电磁参数测量分析, 为后续的样本测试结果分析提供依据。然后, 为探讨煤矸尺寸参数对微波传播的影响, 开展了不同厚度、不同截面积的煤矸介质样本对不同频段电磁波的传播规律研究。由于煤矸混合物是由煤、矸石和空气组成的多尺度介质, 其体积不等、形状各异, 且空间分布及混合形式复杂多变, 在微波照射区域内的散射效应非常复杂, 导致电磁波在不同煤矸混合物中的传播特性具有明显的差异性。最后, 为探究煤矸不同介质混合状态流的微波传播特性变化规律, 开展了不同微波频段、不同煤矸粒度、不同含矸率工况下的煤矸混合物微波探测试验。结果表明: 煤矸介质的电磁参数、厚度和截面积对微波在介质中的传播规律有明显影响; 不同的粒度和含矸率对微波在煤矸混合物的传播规律有一定的影响。当频率大于 4 GHz 的微波照射在煤矸混合物时, 粒度的增大会使回波损耗 S_{11} 、插入损耗 S_{21} 强度值和时域透射波 O_{21} 信号幅值逐渐增大。当混合介质中煤和矸石的电磁参数差异较大时, 在频率大于 3.5 GHz 后, 粒度的增大使 S_{21} 强度由 -35.3 dB 降低至 -38.2 dB, O_{21} 信号幅值由 1.6 mV 减小至 1.26 mV, 且具有一定的时延特性。通过试验分析可以掌握敏感频点下透射波信号强度值、时域透射波信号幅值或透射波信号时延等特征的差异性, 为放顶煤开采的煤矸精准识别提供一种新的思路和方法。

关键词: 煤矸识别; 煤矸混合物; 微波探测; 时域波形

中图分类号: TD679

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)05-0219-13

Experimental study on microwave propagation characteristics of different coal-gangue mixtures

SI Lei, LI Jiahao, XING Feng, WEI Dong, DAI Jianbo, WANG Zhongbin

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The problem of coal-gangue identification is one of the technical problems that have not been effectively solved for a long time in the coal industry. By analyzing the characteristics and limitations of existing coal-gangue identification methods, the feasibility of coal-gangue identification based on microwave detection technology is discussed. Firstly, the electromagnetic parameters of different coals and gangues are measured and analyzed to provide a basis for the subsequent analysis of sample test results. Then, in order to explore the influence of coal gangue size parameters on microwave propagation, the propagation law of coal gangue dielectric samples with different thickness and cross-sectional area on different frequency bands is studied. Because the coal-gangue mixture is a multi-scale medium composed of coal, gangue and air, the volume and shape are different, and the spatial distribution and mixing form are complex and changeable. The scattering effect in the microwave irradiation area is very complex, resulting in obvious differences in the transmission characteristics of

收稿日期: 2022-03-12

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0206

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52074271); 江苏省自然科学基金面上资助项目(BK20211245); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2018]87号)

作者简介: 司 垒(1987—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 博士。Tel: 0516-83590777, E-mail: sileicool@163.com

通讯作者: 王忠宾(1972—), 男, 安徽宿州人, 教授, 博士。Tel: 0516-83590798, E-mail: wzbcmee@163.com

electromagnetic waves in different coal-gangue mixtures. Finally, in order to explore the variation law of microwave propagation characteristics in different coal-gangue media, some microwave detection experiments of coal-gangue mixture under different microwave frequency bands, different particle sizes and different gangue contents are carried out. The results show that: the electromagnetic parameters, thickness and sectional area have obvious influence on the propagation law of microwave in the media. Different particle size and gangue rate have certain influence on microwave propagation in coal-gangue mixture. When microwave with frequency greater than 4 GHz irradiates the coal gangue mixture, the increase of particle size will gradually increase the intensity values of S_{11} and S_{21} and the amplitude of O_{21} signal. When the electromagnetic parameters of coal and gangue in the mixed medium are quite different, after the frequency is greater than 3.5 GHz, the increase of particle size reduces the S_{21} intensity from -35.3 dB to -38.2 dB, and the O_{21} signal amplitude from 1.6 mV to 1.26 mV, with certain time delay characteristics. Through the experimental analysis, the differences of the transmitted wave signal intensity value, the time-domain transmitted wave signal amplitude and the transmitted wave signal delay at the sensitive frequency points can be mastered, so as to provide a new idea and method for accurate identification of coal and gangue in top coal caving face.

Key words: coal-gangue identification; coal-gangue mixture; microwave detection; time-domain waveform

0 引言

长期以来,煤炭作为我国的主体能源,是保障国家经济发展的重要基础性能源^[1]。随着我国经济发展方式的转变,煤炭行业也由粗放的生产方式向集约化、精细化方向转型,煤矿的智能化已成为煤炭安全高效开采的发展方向与必然趋势^[2]。煤矸精准识别作为煤炭领域亟需解决的技术难题,是采煤和分选环节智能化运行的关键技术之一,国内外学者对其已经有了近30年的研究积累。

目前,煤矸识别多采用自然射线、图像处理和信号处理等方法。射线法是最早开始研究的方法,其优点是受井下粉尘、水雾等环境影响较小。刘长友等^[3]提出了以自然射线辐射强度作为煤-矸-岩自动识别的主要参数。赵明鑫^[4]分析了放煤过程中自然 γ 辐射场的特点和探测器空间位置变化对探测效率的影响规律。张宁波等^[5-6]研究了双能 γ 射线在煤矸混合物中的衰减规律以及煤矸混合物中含矸量的确定方法,并通过放顶煤模拟试验对矸石低水平自然射线的涨落规律进行了验证。在放煤过程中煤矸必然会与矿山装备发生碰撞而产生各种信号,基于煤矸物理性质不同引起的振动或声音信号的差异,袁源等^[7]设计了感应尾梁动作并自动触发数据采集的放煤声信号采集装置,构建了放顶煤声信号分类样本库。张守祥等^[8]提出了利用振动信号解决放顶煤过程中的动态煤矸识别问题,初步实现了综放工作面的煤矸识别。窦希杰等^[9-10]研究了基于IMF能量矩和SVM的煤矸识别方法,结果表明该方法且具有较高的识别准确率。刘富强等^[11]通过采用图像处理和模式识别技术对煤块和矸石进行识别,从而达到了煤矸自动分选的目的。司垒等^[12]通过构建综采工作面煤岩图像语义分割数据集对改进U-net网络模型进行训练和测试,实现了煤岩图像的精准识别。

国内外学者经过对煤矸混合度识别技术进行了长期的基础研究后,在综放开采领域取得了可喜的进展,并在部分煤矿得到了初步的工业性应用。但由于工作面煤岩性状特征复杂多变,适用于放煤工作面的 γ 射线采集、数据处理等技术尚不成熟,且放射性会给人体带来潜在威胁,无法满足井下安全管理,导致 γ 射线法无法推广应用;另外,图像分析法没有完全考虑光照强度、湿度、煤尘等因素对识别结果的影响,缺乏代表性和实用性;同时,工作面大量的环境噪声导致煤和矸石撞击液压支架尾梁产生的声波和振动信号干扰较大,无法精确预测放煤口矸石混入情况。上述种种现象,导致当前煤矸识别技术仍无法推广应用^[13]。

电磁波信号具有其它传感信号(如振动、红外、可见光图像等)所不可比拟的优点,几乎可以在所有物质中传播,而且其较宽的频率范围可以实现高精度监测。而微波是指波长介于红外线和无线电波之间的电磁波,其频率范围在300 MHz~300 GHz,所对应的波长为0.001~1 m^[14],具有灵敏度高、检测速度快、非接触的特点^[15],已在诸多领域进行广泛应用,如无损检测材料缺陷^[16]、穿墙成像^[17]、以及地理勘探领域的探地雷达成像^[18]等。因此,将微波探测技术引入煤炭领域,旨在为煤矸识别方法提供一种新的研究思路。

目前国内外已有很多学者对电磁波在煤岩的传播特性进行了研究。王昕等^[19]建立了煤岩界面的分层介质模型,结合雷达方程分析了雷达波在该模型中的散射规律,分析了煤岩电参数和天线对探测深度的影响。贾成艳等^[20]研究了煤层对太赫兹前端频率附近的电磁波(75~750 GHz)的衰减特性。文虎等^[21]采用时域有限差分法(FDTD)建立井下二维空间磁场(TM)模型,揭示了电磁波在煤体中的传播规律。岳蕾^[22]对均匀煤层中的电磁传播规律进行了研

究,探讨了频率对电磁波损耗的关系。

可以看出,目前电磁波在煤矿中的研究主要集中在煤层探厚和地质探测等方向,将煤层或矸石层视为均匀介质处理。然而针对电磁波在煤矸混合物中的传播和衰减规律却鲜有研究。煤矸混合物是由煤、矸石和空气组成的多尺度混合介质,其电磁参数不同、体积不等、形状各异,且空间分布及混合形式复杂多变。对于煤矸混合物这类散射体,微波辐射区域内散射效应更复杂、非线性程度更显著。因此,非常有必要开展不同频段、不同煤样、不同粒度和不同含矸率的煤矸混合物微波传播特性试验研究,进而完善煤矸微波散射的理论体系,并为煤矸的精准识别提供新的理论和方法。

1 试验原理

空间平面电磁波垂直入射到介质上时,一部分能量被反射,另外一部分穿透介质表面,产生反射波和透射波。宏观电磁波传播的基本规律可由 Maxwell 方程组概括^[23],其方程组的微分形式如下所示:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度, A/m; \mathbf{E} 为电场强度, V/m; \mathbf{B} 为磁感应强度, T; \mathbf{D} 为电位移矢量, C/m²; \mathbf{J} 为电流密度, A/m²; ρ 为电荷密度, C/m²。

同时,还需考虑电磁场传播过程中介质的电磁参数对电磁场传播的影响,因此,需引入电场和磁场中物质的本构关系,其形式如下所示:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

式中: ε_0 为真空中的介电常数; ε_r 为媒质的介电常数, F/m; μ_0 为真空中磁导率; μ_r 为媒质的磁导率, H/m; σ 为介质的电导率, S/m。

由上述公式可以看出,微波的传输特性(反射、吸收、透射)跟介质的介电常数 ε_r 和磁导率 μ_r 有关。 S 参数,也称为散射参数,是微波传输中的一个重要参数,可以全面直观地表示一个物体的性能指标。其中 S_{11} 表征回波损耗,即有多少能量被反射回发射源端; S_{21} 表征信号从发射端口经过传输介质后传递到接收端口的损耗情况。如图 1 所示, T_i 为发射信

号, R_i 为回波信号,微波信号经发射天线垂直入射到煤矸混合物样本上,遇到煤矸混合物样本后会发生反射、吸收和透射作用,接收天线端接收穿过煤矸混合物透射的微波信号。煤矸混合物是由煤、矸石和空气组成的多尺度混合物,其电磁参数不同、体积不等、形状各异,且空间分布及混合形式复杂多变,微波发射天线产生的电磁波在多尺度、电磁特性随机分布的混合物中传播时,必然会沿各个方向发生散射,造成大量不相干波,导致微波的幅度、相位等特性具有相应的随机性和各向异性。所以检测不同的煤矸混合物样本时其传播特性存在较大的差异,可以通过采集回波损耗 S_{11} 和插入损耗 S_{21} 对其微波传播特性进行研究。

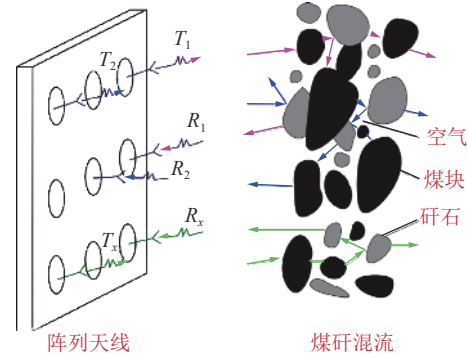


图 1 煤矸混合物散射模型

Fig.1 Scattering model for coal-gangue mixtures

2 试验系统搭建

为探究不同煤矸混合物的微波传播特性,笔者搭建了煤矸微波探测试验系统,如图 2 所示,将矢量网络分析仪作为信号源,设置发射天线及接收天线对煤矸混合物进行微波照射,并利用计算机完成数据的采集及处理。

试验中所用的矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)是一台多通道微波接收机,其频率覆盖范围为 400 MHz ~ 8.5 GHz,可以实现全双端口 S 参数测量,具有非常高的测量精度。微波发射天线与微波接收天线间隔一定距离平行固定,煤矸混合物样本置于两者之间,利用矢量网络分析仪采集不同煤矸混合物样本的回波损耗 S_{11} 和插入损耗 S_{21} ,然后对煤矸混合物的微波传播特性进行研究。其中发射天线与接收天线之间的距离由天线远场测试判定式(8)进行确定。

$$r \geq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (8)$$

其中, r 为接发天线之间的距离; L 为天线口径的

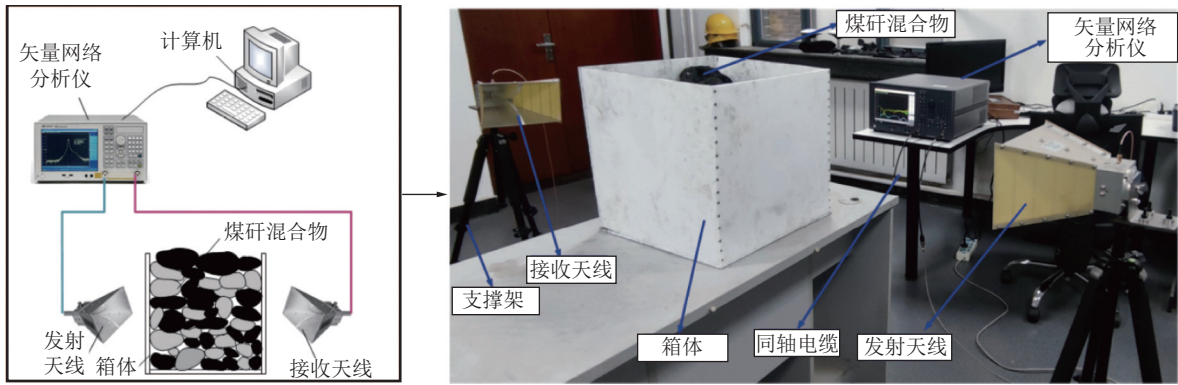


图 2 煤矸微波探测试验系统

Fig.2 Microwave detection experimental system for coal and gangue

最长边; λ 为中心频率对应的波长。文中所采用的接发天线之间的距离为 3 m。

为探讨不同频率下的煤矸微波传输特性,收发天线采用的是双脊喇叭天线,工作频率为 1 ~ 18 GHz,超宽频带满足试验要求。同时,为减少箱体对试验结果的影响,箱体材料采用聚四氟乙烯(PTFE),该材料具有较小的介电常数(2.1 左右)以及介电损耗(0.000 4),可以极大地降低电磁波传播中的信号损失,是一种良好的透波材料,目前被广泛应用于雷达天线罩、5G 基站元器件等。试验中,采用的箱体的尺寸为 400 mm×400 mm×400 mm。

煤和矸石的电磁参数包括:相对介电常数、电导率以及磁导率,这些参数决定了电磁波在煤矸介质中的传播特性。通常情况下,对于煤、矸石这类非磁化介质,其磁导率可以认为与真空中的磁导率相等。为确定不同煤和矸石的电磁参数,笔者利用原煤和矸石制作了固定形状大小的煤和矸石试样,如图 3 所示,并采用自由空间法对 5 种煤和 1 种矸石的相对介电常数和电导率等电磁参数进行测量,为后续的样本试验结果分析提供数据支撑。

在此基础上,以肥煤、无烟煤和矸石为例,开展不同微波频段、不同煤矸尺寸、不同含矸率等工况下的煤矸微波探测试验,具体试验方案见表 1。

3 煤矸电磁参数测量

通过对样品的相对介电常数以及电导率的测量,可以为后续的样本测试结果分析提供依据。

目前介电常数的测量方法主要有同轴探头法、传输线法、谐振腔法以及自由空间法等。同轴探头法通过将探头侵入液体或用其接触固体材料的平坦表面,之后通过矢量网络分析仪测得的 S_{11} 再换算到介电常数,该方法要求被测材料为液体、软质整合固

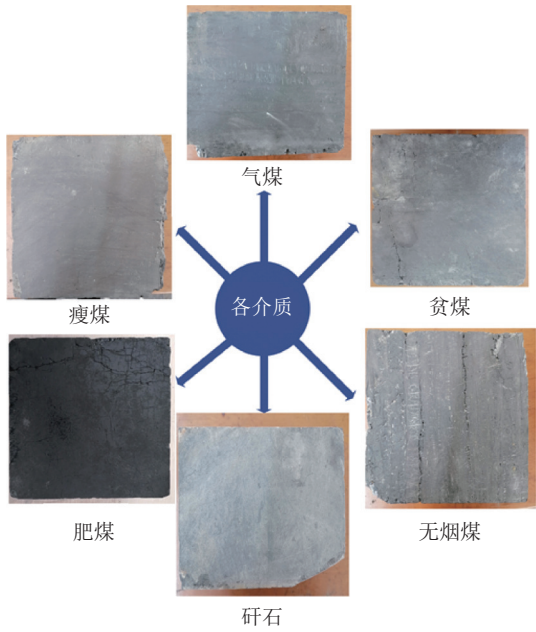


图 3 制作的煤和矸石试样

Fig.3 Prepared coal and gangue samples

体、半固体、无空隙等。传输线法需要将材料置于一部分封闭的传输线内部,要求被测材料为固体,且尺寸可精确塑性为环状或方块状,同时要求表面足够光滑以保证样品可以充满夹具不留间隙。谐振腔法使用矢量网络分析仪来测量谐振频率和谐振腔体夹具的品质因数 Q 值,要求样品为平坦薄片,厚度为 0.05 ~ 5 mm,该方法测量精度高(约为±1%),但不支持宽带测试,且对样品要求较高。自由空间法与传输线法类似,相当于传输线法的一种特例。它是将材料填充在 2 个天线之间以进行非接触测量,介电常数根据矢量网络分析仪测得的 S_{11} 和 S_{21} 计算得出的,该方法要求被测材料平行表面、均匀,其测量频率一般在 2 GHz 及以上。基于上述各种方法的优缺点,结合煤和矸石的物理特性,笔者采用自由空间法进行煤矸样品的介电常数测量。

表 1 煤和矸石的微波探测试验方案

Table 1 Experimental scheme of coal-gangue microwave detection

试验参数	
煤样类别	无烟煤 肥煤
工作频率/GHz	1 ~ 8
试样厚度/cm	10 20 40
试样截面积/(cm×cm)	10×10 20×20 40×40
煤矸粒度/cm	3 ~ 5 8 ~ 12 15 ~ 20
含矸率(矸石占比)/%	0 10 20 30 40 50

以煤或矸石为原料制成各向同性、均匀分布的平板试样,其厚度为 d ,复介电常数为 ε 。利用矢量网络分析仪自带的激励源产生频率为 f 的微波信号,经同轴传输线馈入到双脊喇叭天线中,并对煤矸平板试样进行照射。电磁波在煤矸平板试样中的传输过程如图 4 所示,其中 Γ 表示材料的宽度, d 无限大时在界面 A 处的反射系数,由对称性可得,界面 B 处的反射系数为 $-\Gamma$, T 为材料的宽度, d 为有限值时的透射系数。

设激励信号经发射天线传播后在煤矸介质表面的入射电压为 V_i ,总的反射电压和透射电压分别为 V_r 和 V_t ,则它们与散射参数之间的关系如下:

$$V_r = S_{11}V_i, V_t = S_{21}V_i \quad (9)$$

总的反射电压和透射电压的表达式为:

$$V_r = \Gamma - [(1 - \Gamma^2)/\Gamma] \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^{2n} T^{2n} \quad (10)$$

$$V_t = (1 - \Gamma^2)T - (1 - \Gamma^2)\Gamma \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma^{2n} T^{2n}$$

令入射电压 $V_i=1$,则 S_{11} 和 S_{21} 分别与总反射电压和透射电压相对应,即:

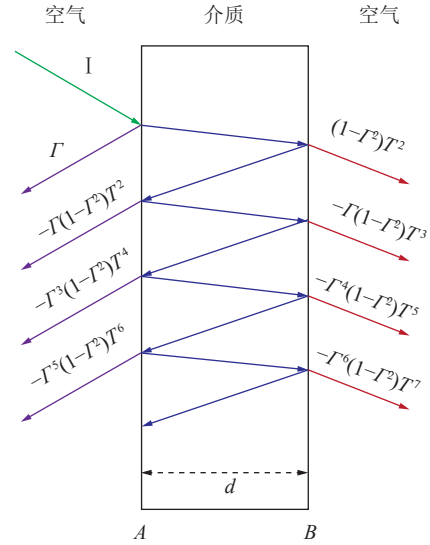


图 4 电磁波在煤矸试样中的反射与传输情况

Fig.4 Reflection and transmission of electromagnetic wave in coal-gangue sample

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2}, S_{21} = \frac{T(1 - \Gamma^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \quad (11)$$

由等效二端口理论可得:

$$\eta_r = \frac{\Gamma + 1}{1 - \Gamma} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (12)$$

$$\Gamma = -\frac{\ln T}{d} = j2\pi f \sqrt{\mu\varepsilon}$$

其中, ε 为介质的复介电常数; μ 为介质的复磁导率,对于煤以及矸石这类非磁化物质 $\mu \approx 1$;j为复数符号; η_r 为待测材料的归一化特性阻抗; Γ 为波在介质中的传播常数。由上式可得:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} \quad (13)$$

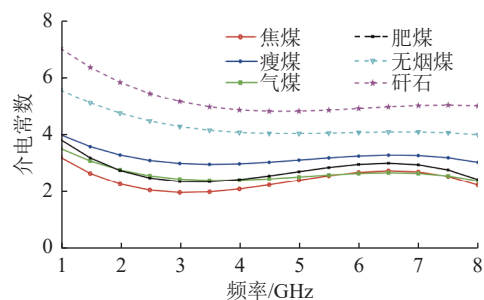
由此可得介质的相对介电常数 ε_r 和电导率 σ 等电磁参数。

利用上述方法对焦煤、瘦煤、气煤、肥煤、无烟煤和矸石等 6 种试样的电磁参数进行测量,结果如图 5 所示。可以看出,烟煤中各煤种的相对介电常数之间存在一定差异,但差距较小;无烟煤的相对介电常数相较于烟煤的相对介电常数有明显区别,同时与相对介电常数最高的矸石差别较小。在电导率方面,矸石的电导率最大,无烟煤次之,其余煤种的电导率较小,且焦煤、瘦煤及气煤的电导率大小相近。

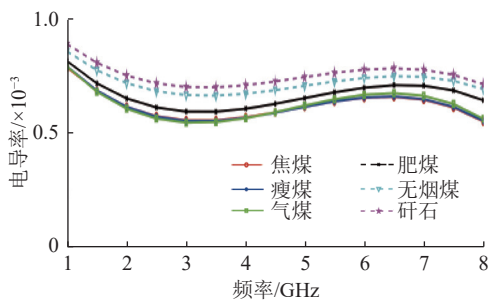
4 试验结果与分析

4.1 煤矸尺寸参数对传播特性的影响

在微波探测过程中,煤和矸石的厚度、截面积等尺寸参数会对电磁波的传播产生一定影响。因此,



(a) 不同频率下的相对介电常数



(b) 不同频率下的电导率

图5 不同煤矽试样的电磁参数测量结果

Fig.5 Measurement results of electromagnetic parameters of different coal-gangue samples

在煤矽混合物微波探测试验之前,首先探讨煤和矽石的各尺寸参数对微波传播的影响规律。

4.1.1 煤矽介质对传播特性的影响

由于我国煤层赋存情况复杂多变,不同煤岩的形成过程不同,导致了各种煤、矽石的成分和结构特征都存在差异,因此对于不同的煤、矽石的电磁波传播特性也不尽相同。为探讨电磁波传播的差异性,将不同的煤矽介质制作成 400 mm×400 mm×100 mm 的长方体块,将其 400 mm×400 mm 的两平面与喇叭天线的喇叭口端面平行,放置于如图 2 所示的试验系统中。利用矢量网络分析仪作为激励源以及信号接收器,两端的接发天线作为信号的输出和接收。所测得的复数值经对数化处理可以得到 S_{11} 和 S_{21} 曲线,如图 6 所示。

由图 6a 可以看出,随着频率的增加,煤和矽石的反射强度有增大的趋势。其次,随着相对介电常数的增加,反射系数逐渐增大,导致矽石的反射信号强度最高,无烟煤次之,焦煤的反射强度最低,其余煤种反射信号强度差异较小。由图 6b 可以看出,所有介质下得到的 S_{21} 值均随着频率的增加而逐渐减小,说明电磁波在煤矽介质中的衰减程度逐渐增加。同时,随着相对介电常数及电导率的增加,介质对电磁波的衰减逐渐增加,因此,矢量网络分析获取矽石的 S_{21} 值最小。为进一步探究微波传播信号在时域

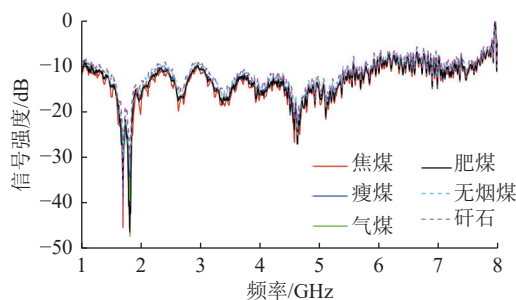
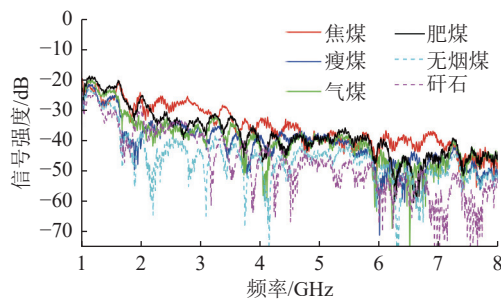
(a) S_{11} 曲线(b) S_{21} 曲线

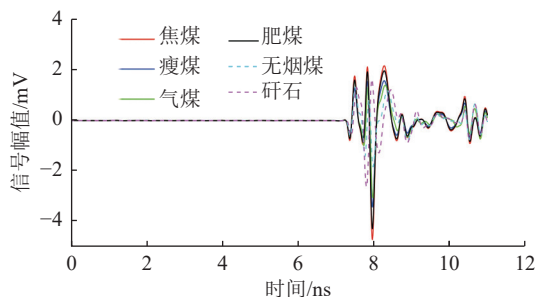
图6 不同煤矽介质的信号变化情况

Fig.6 Signal variation of different coal-gangue medium

内的变化规律,利用激励源及矢量网络分析仪获取的 S_{21} 复数形式,通过傅里叶变换处理,得到时域透射波信号 O_{21} ,如图 7 所示。可以看出,随着介质相对介电常数及电导率的增加,接收天线所接收到的时域信号 O_{21} 幅值增大;如式(14)所示,电磁波在介质中的传播速度与介质的电磁参数相关,可以看出相对介电常数的增加会使电磁波在介质中的传播速度减小,从而导致接收天线的时域信号 O_{21} 出现时延现象,且随着相对介电常数的增加延迟时间增大。

$$v = \frac{c_0}{n_r} \quad (14)$$

式中: c_0 为自由空间中的光速; n_r 为介质的折射率, $n_r = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ 。

图7 不同煤矽介质的 O_{21} 时域波形Fig.7 Time domain waveform of O_{21} with different coal-gangue medium

4.1.2 煤样厚度对传播特性的影响

为探究煤矽介质在与电磁波传播方向一致方向

上尺寸变化对电磁波传播特性的影响,笔者以肥煤为例,研制了等截面积(20 cm×20 cm)下厚度为 10、20、30 和 40 cm 的试样,如图 8 所示。

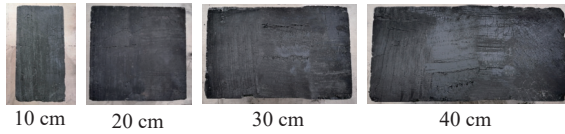


图 8 不同厚度的煤样

Fig.8 Coal samples with different thickness

图 9 给出了同一介质在相同截面尺寸下,微波照射不同厚度的肥煤后矢量网络分析仪所测得的 S_{11} 和 S_{21} 变化曲线及时域波形 O_{21} 。可以看出,在截面积相同的情况下,4 组厚度参数所测量的 S_{11} 曲线没有明显变化,说明介质厚度对微波的反射信号影响较小。随着煤块厚度的增加电磁波在煤块中衰减程度呈增多趋势,此时矢量网络分析仪所得到的 S_{21} 呈减小趋势。但在 3 GHz 之前,由于电磁波的频率

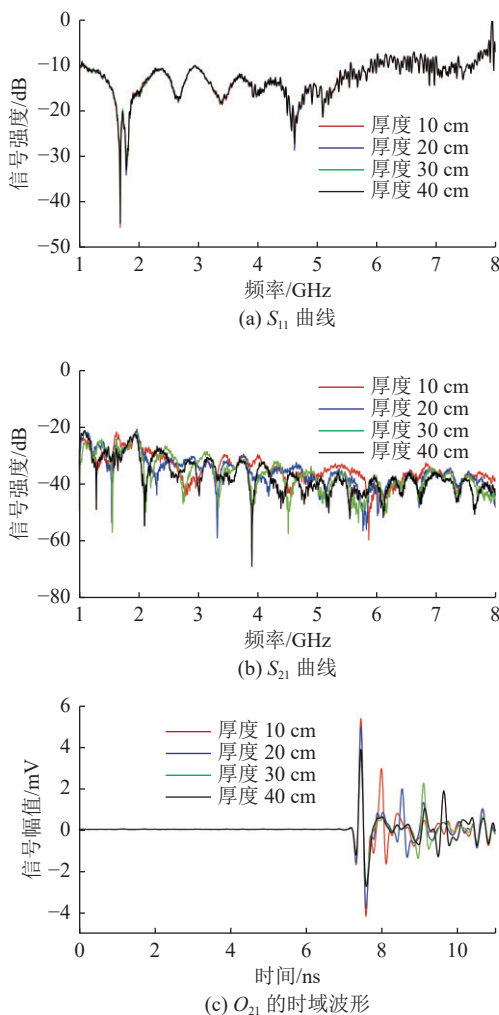


图 9 不同煤样厚度的信号变化情况

Fig.9 Signal variation of different coal sample thickness

较低,在介质中的衰减较少,在不同厚度下得到的 S_{21} 曲线没有明显变化;在 3 GHz 之后电磁波在介质中的衰减逐渐增加。

另外,从图 9b 可以看出,在 7.7 ns 左右的第一个波峰为电磁波从发射天线发出后通过介质两侧的空气直接传输到接收天线中的一部分电磁波,随着煤样介质厚度的增大,从两侧传播的电磁波能量减少,在此之后的波峰为电磁波穿透介质后被接收天线所采集。同时,随着厚度的增加,接收天线接收到的透射波 O_{21} 信号幅值逐渐减小,且时延逐渐增大。

4.1.3 煤样截面积对传播特性的影响

为探究煤矸介质在与电磁波传播的垂直方向上尺寸变化对电磁波传播特性的影响,同样以肥煤为例,研制了等厚度(10 cm)下载面积分别为 10 cm×10 cm、20 cm×20 cm 和 40 cm×40 cm 的试样,如图 10 所示。

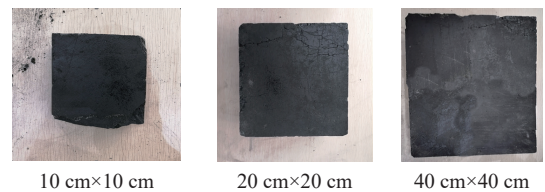


图 10 不同截面积的煤样

Fig.10 Coal samples with different cross-sectional areas

图 11 给出了同一介质在相同厚度尺寸下,微波照射不同截面积的肥煤后矢量网络分析仪所测得的 S_{11} 和 S_{21} 变化曲线及 O_{21} 时域波形。由图 11a 可以看出,随着频率的增加,不同截面尺寸下的反射信号强度逐渐增大。同时,随着截面尺寸的增加,参与电磁波反射的介质平面增大,但信号反射强度的增强幅度有限。这可能与天线到介质的距离有关,试验中为使电磁波传输到介质时更加接近于平面波,天线距离较大,导致电磁波在传播过程中存在一定程度的衰减使 S_{11} 曲线没有明显变化。由图 11b 和图 11c 可以看出,随着截面尺寸的增加,矢量网络分析仪得到的 S_{21} 参数的能量分贝值逐渐降低,时域透射波 O_{21} 的幅值逐渐减小,主要原因是参与电磁波损耗的介质逐渐增多。

4.2 煤矸混合物相关参数对传播特征的影响

在煤炭领域,带式输送机或刮板输送机上的煤矸混合物中包含煤块、矸石以及空气,其体积不等、形状各异,且空间分布及混合形式复杂多变。因此,为探究煤矸混合物中各参数与电磁波传播规律的内在联系,笔者根据图 5 所示煤矸电磁参数测量结果,选取肥煤和无烟煤为试验对象,开展不同煤矸粒度

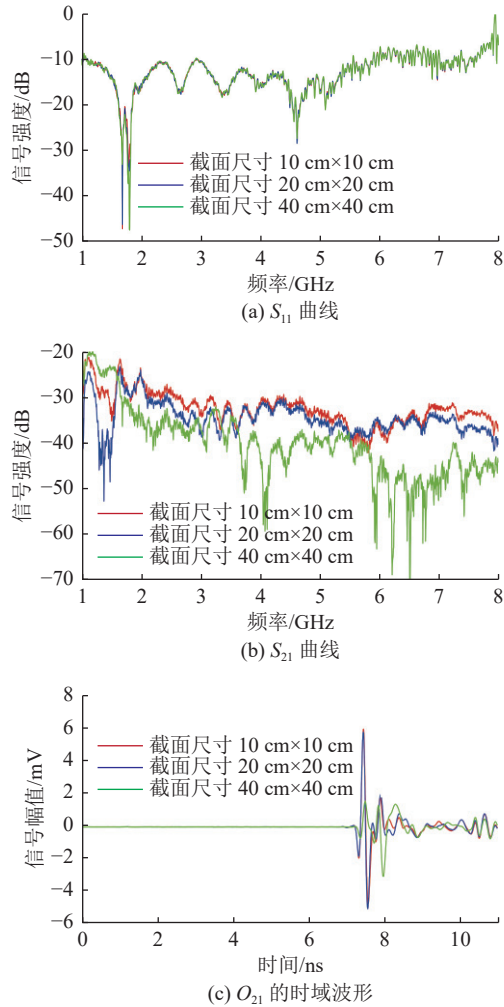


图 11 不同煤样截面面积的信号变化情况
Fig.11 Signal variation of different cross-sectional areas

和不同含矸率工况下煤矸混合物的微波照射试验。

4.2.1 煤矸粒度对传播特性的影响

在煤矸混合物中,煤和矸石的尺寸随机,而当电磁波的波长远大于介质的尺寸时,电磁波通常会绕射障碍物从而产生较少的反射;当电磁波的波长与介质的尺寸相当时或略小于介质尺寸时会产生较多反射;当电磁波的波长远小于介质时此时电磁波在介质中的衰减更大,但电磁波中的能量随着频率的增加而增加,因此当电磁波的频率足够大时,虽然会有衰减但是巨大的能量依然可以穿透介质。笔者以无烟煤和矸石为例,依据表 2 所示的试验方案进行微波照射试验,不同粒度的煤矸混合物如图 12 所示。

为降低环境因素的影响、提高测量精度,每组试验重复 25 次,并将结果整合取其平均值,矢量网络分析仪所得的 S_{11} 曲线如图 13 所示。可以看出,当频率在 4 GHz 之前,电磁波的波长较长,微波照射到

表 2 不同粒度的微波照射参数

Table 2 Microwave irradiation parameters of different particle sizes

编号	质量占比/%		煤类别	粒度/cm	频率/GHz
	煤块	矸石			
1	60	30	无烟煤	3~5	1~8
2	60	30	无烟煤	8~10	1~8
3	60	30	无烟煤	15~20	1~8



图 12 不同粒度的煤矸混合物
Fig.12 Coal-gangue mixtures with different particle sizes

3 种粒度下的煤矸混合物后所得到的 S_{11} 曲线没有明显变化;而在 4 GHz 之后,随着电磁波频率进一步增加,电磁波波长逐渐减小,3 种粒度下的 S_{11} 曲线开始出现不规律性波动。同时,随着煤矸粒度的增大,电磁波的波长与介质尺寸之间的差值随之增大,电磁波的反射信号强度也随之增加。

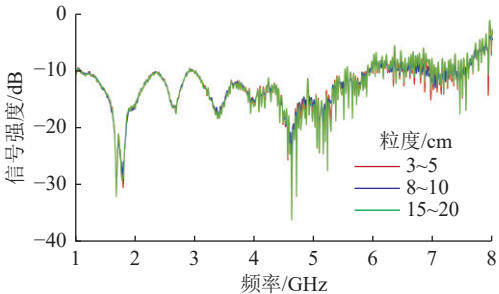
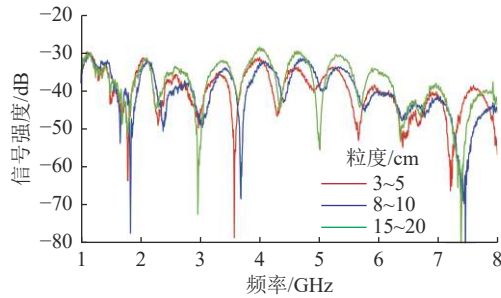


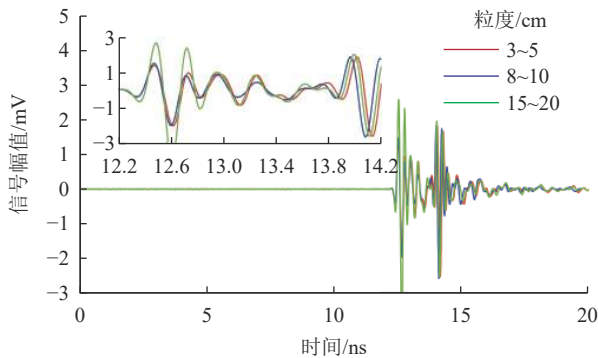
图 13 不同粒度下煤矸混合物的 S_{11} 曲线
Fig.13 S_{11} curves of coal-gangue mixtures with different particle sizes

通过上述步骤矢量网络分析仪所测得的 S_{21} 曲线如图 14 所示。可以看出当频率在 2.5 GHz 之前,3 种粒度下的 S_{21} 曲线没有明显变化;而当频率在 2.5~6 GHz 时,随着煤矸粒度的增加所得到的 S_{21} 值也会逐渐增大,主要原因是随着粒度的增大,煤块与煤块、煤块与矸石之间的空隙逐渐增大,从而使相同体积下煤矸混合物中的煤块和矸石含量减少,进而减少了对电磁波的衰减。当频率在 6~8 GHz 时,随着电磁波的波长进一步减小,电磁波在介质中的反射与折射逐渐增多,这使得电磁波的散射逐渐增强,使得所测得的 S_{11} 和 S_{21} 值波动较大,呈现出较大的

图 14 不同粒度下煤矸混合物的 S_{21} 曲线Fig.14 S_{21} curves of coal-gangue mixtures with different particle sizes

不规律性。

同时,对透射波信号强度值 S_{21} 进行傅里叶逆变换所得到的时域透射波 O_{21} 如图 15 所示,其中内嵌的图像为 12.2 ~ 14.2 ns 的局部放大图。可以看出在 12.2 ~ 12.5 ns,随着煤矸粒度的增大,时域透射波的信号幅值逐渐增大,粒度在 3 ~ 5 cm 的煤矸混合物信号峰值只有 1.3 mV,而粒度在 15 ~ 20 cm 的煤矸混合物信号峰值可达 2.5 mV。主要原因也是由于粒度增大导致间隙增多,进而降低了对电磁波的衰减程度。而由于电磁波在不同粒度的煤矸混合物中产生反射,使得电磁波在煤矸混合物介质中的传播路径具有一定的随机性,从而没有出现明显的时延现象。

图 15 不同粒度下煤矸混合物的 O_{21} 曲线Fig.15 O_{21} curves of coal-gangue mixtures with different particle sizes

4.2.2 含矸率对传播特性的影响

煤矸混合物中矸石含量的准确识别是实现煤矸智能分选和顶煤放落过程的智能控制的核心技术。根据 4.1 节测得的煤矸介电常数,选取肥煤、无烟煤分别与矸石依据表 3 所示的试验参数进行混合,并放置于箱体中进行微波照射试验。不同含矸率的煤矸混合物如图 16 所示。

同样,每组试验重复 25 次,结果取平均值,由此

表 3 不同含矸率的微波照射参数

Table 3 Microwave irradiation parameters of different rate of gangue

编号	质量占比/%		煤类别	粒度/cm	频率/GHz
	煤块	矸石			
1	90	0	无烟煤	8 ~ 12	1 ~ 8
2	80	10			
3	70	20			
4	60	30			
5	50	40			
6	40	50			
7	90	0	烟煤		
8	80	10			
9	70	20			
10	60	30			
11	50	40			
12	40	50			

矢量网络分析仪所得的 S_{11} 曲线如图 17 所示。从图 17 可以看出在 4 GHz 之前,由于电磁波波长较大,不同含矸率的 S_{11} 曲线基本重合,而在 4 GHz 之后的 S_{11} 曲线有着明显的波动情况,主要原因是 S_{11} 曲线反映的是微波照射到煤矸混合物后反射波信号,受到煤矸混合物表面形状及含矸率的影响,且在试验过程中煤矸尺寸在 8 ~ 12 cm 内随机分布,因此在高频情况下,微波照射在煤矸混合物的 S_{11} 曲线具有不规律性波动。

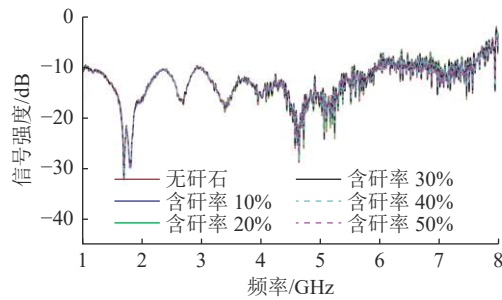
同样,按照上述试验步骤测得的 S_{21} 曲线如图 18 所示,在 3.5 GHz 不同煤种中不同含矸率的信号强度如图 19 所示。从图 18a 和图 19 肥煤的曲线可以明显看出,由于矸石对电磁波的衰减程度比煤块大,在频率为 3.5 GHz 之前,随着含矸率的增加,煤矸混合物对电磁波的衰减程度也逐渐增大,信号强度值由 -35.3 dB 降低至 -38.2 dB,矢量网络分析仪测得的 S_{21} 值随之降低。而在 3.5 GHz 之后,随着电磁波频率的增大,电磁波的波长逐渐减小,电磁波在煤矸介质中产生更多的反射与折射,矢量网络分析测得不同含矸率的 S_{21} 曲线呈现较大的波动。而从图 18b 和图 19 无烟煤的曲线可知,由于无烟煤与矸石的电磁参数相差较小以及煤矸形状的不规则特征,因此不同含矸率之间的透射波信号没有明显变化。

为了进一步分析透射波的时域信号变化规律,图 20 给出了经傅里叶变换后的透射波时域曲线 O_{21} ,图 21 给出了在 12.4 ns 左右不同煤种在不同含矸率

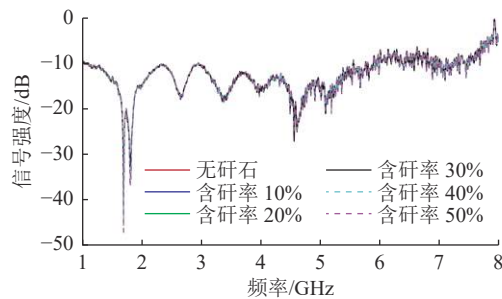


图 16 不同含矸率的煤矸混合物

Fig.16 Coal-gangue mixture with different gangue ratios



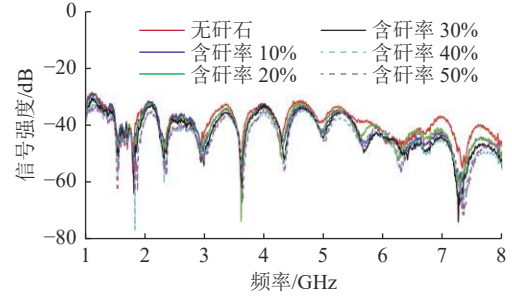
(a) 肥煤中的不同含矸率



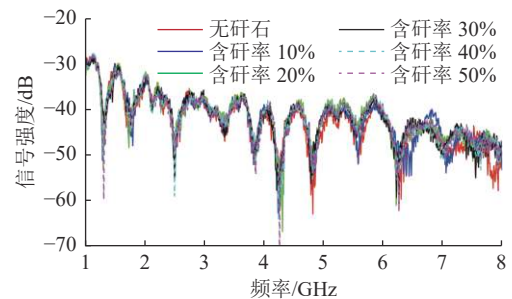
(b) 无烟煤中的不同含矸率

图 17 煤矸混合物中不同含矸率的 S_{11} 曲线

Fig.17 S_{11} curves with different gangue ratios in coal-gangue mixture



(a) 肥煤中的不同含矸率



(b) 无烟煤中的不同含矸率

图 18 煤矸混合物中不同含矸率的 S_{21} 曲线

Fig.18 S_{21} curves with different gangue ratios in coal-gangue mixture

的 O_{21} 曲线峰值点的特征曲线。从图 20a 和图 21 中肥煤的曲线可以看出,随着含矸率的增加,时域透射

波信号的幅值由 1.6 mV 逐渐减小至 1.26 mV,且具有较大相对介电常数的矸石会有效降低电磁波的传

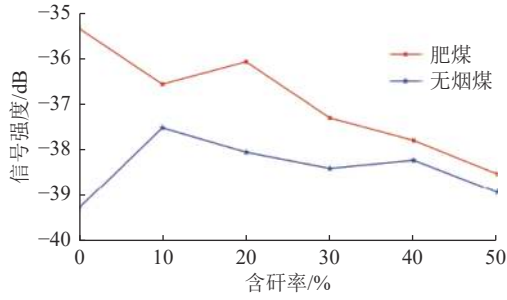


图 19 3.5 GHz 处不同煤种中不同含矸率的信号强度
Fig.19 Signal strength at different gangue-containing rates at 3.5 GHz

播速度,接收的透射波信号时延由 12.42 ns 逐渐增大至 12.50 ns。而在图 20b 和图 21 中无烟煤的曲线中,由于无烟煤与矸石的电磁参数比较接近,在时域内的透射波信号受含矸率的影响较小,导致不同含矸率的透射波信号幅值在不同频率下没有明显变化。

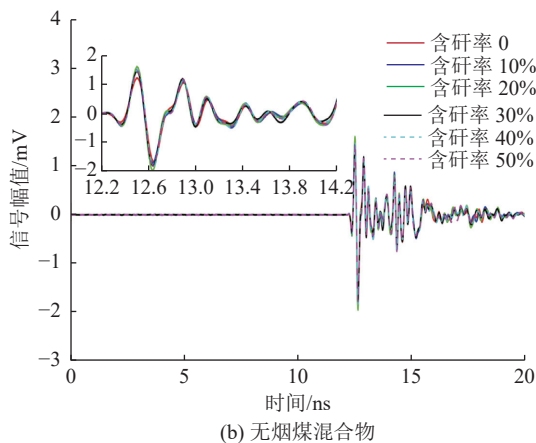
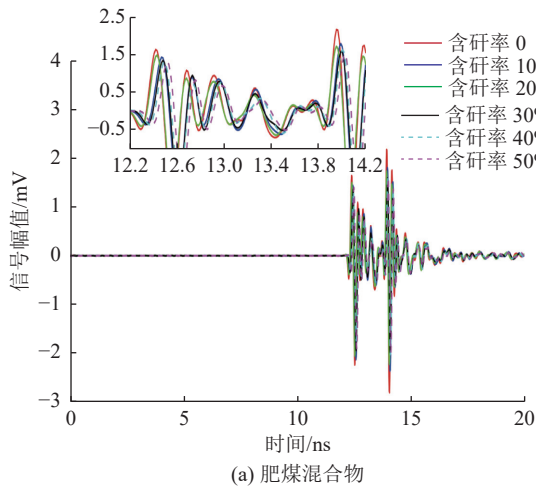
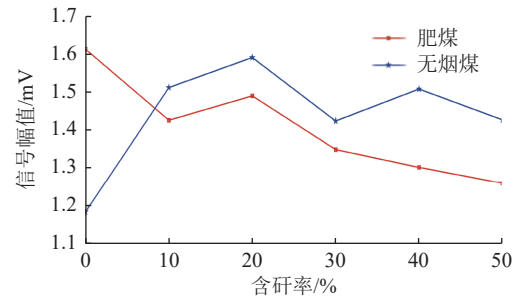
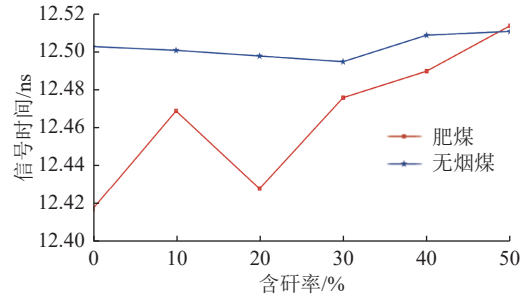


图 20 煤矸混合物中不同含矸率的 O_{21} 曲线
Fig.20 O_{21} curves with different gangue ratios in coal-gangue mixture

综上所述,对于单个煤和矸石介质,依据介质的信号时延的大小可以判断煤岩厚度,还可以依据信



(a) 信号幅值与含矸率的关系



(b) 信号幅值所在时间与含矸率关系

图 21 12.4 ns 左右不同含矸率 O_{21} 曲线峰值点特征
Fig.21 Characteristics of the peak point of the O_{21} curve with different gangue ratios around 12.4 ns

号幅值差异区分出不同的煤矸介质。针对煤矸混合物,对于电磁参数与矸石差异较大的煤种(例如肥煤),可以依据敏感频点(如图 18a 中的 3.5 GHz)、透射波信号 S_{21} 值的差异、时域信号 O_{21} 的幅值或透射波信号时延差异等特征进行煤和矸石的区分,为放顶煤工作面中放煤后的煤矸精准识别提供一种新思路。

5 结 论

1)煤矸介质的电磁参数对微波在介质中的传播规律有明显的影响。随着电磁参数的增大,测得的 S_{11} 强度值逐渐增大,而 S_{21} 强度值和傅里叶变换后的时域信号幅值逐渐减小。同时,由于电磁波在介质中的传播速度与介质的相对介电常数成反比,因此相对介电常数较大的介质所得到的 S_{21} 强度值减小, O_{21} 信号时延增大。

2)煤矸介质的厚度和截面积对测得的反射波和透射波信号均有影响。随着电磁波传播方向尺寸的增大, S_{21} 强度值和傅里叶变换后的时域信号幅值逐渐减小;同时所得到的 O_{21} 信号时延逐渐增大。随着电磁波传播方向垂直尺寸增大,参与电磁损耗的介质增多,测得的 S_{21} 强度值及 O_{21} 信号幅值逐渐减小。

3)煤和矸石的粒度对微波在煤矸混合介质中的传播有一定的影响。当频率在 4 GHz 之后,随着粒

度的增大,微波波长与介质尺寸之间的差值逐渐增大,测得的 S_{11} 强度值逐渐增大。对于透射波信号,当频率在 2.5 ~ 6 GHz,粒度的增大导致同体积下参与电磁衰减的煤矸含量减小,致使 S_{21} 强度值逐渐增大、 O_{21} 信号幅值由 1.3 mV 逐渐增大至 2.5 mV。

4)当微波照射在不同含矸率下的肥煤-矸石混合物时,随着矸石含量的增大,煤矸混合物对电磁波的衰减程度增加,在 3.5 GHz 之后测得的 S_{21} 强度值由 -35.3 dB 降低至 -38.2 dB, O_{21} 信号幅值由 1.6 mV 减小至 1.26 mV,时延由 12.42 ns 逐渐增大至 12.50 ns。

参考文献(References):

- [1] 谢和平,王金华,王国法,等.煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J].煤炭学报,2018(5): 1187-1197.
XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, *et al.* New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. Journal of China Coal Society, 2018(5): 1187-1197.
- [2] 王国法,范京道,徐亚军,等.煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J].工矿自动化,2018,44(2): 5-12.
WANG Guofa, FAN Jingdao, XU Yajun, *et al.* Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 5-12.
- [3] 刘长友,张宁波,郭凤岐,等.特厚煤层综放煤-矸-岩放落流动的时序规律及识别方法[J].煤炭学报,2022,47(1): 137-151.
LIU Changyou, ZHANG Ningbo, GUO Fengqi, *et al.* Sequential rules and identification method of coal-gangue-rock caving flow in fully mechanized top-coal-caving workface of extra thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 137-151.
- [4] 赵明鑫.综放煤矸放落的环境特征及自动识别的影响因素研究[D].徐州:中国矿业大学,2020.
ZHAO Mingxin. Study on drawing environmental characteristics and influence factors of coal-gangue automatic identification in fully mechanized top coal caving mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [5] 张宁波,刘长友,陈现辉,等.综放煤矸低水平自然射线的涨落规律及测量识别分析[J].煤炭学报,2015,40(5): 988-993.
ZHANG Ningbo, LIU Changyou, CHEN Xianhui, *et al.* Measurement analysis on the fluctuation characteristics of low level natural radiation from gangue[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 988-993.
- [6] 张宁波.综放开采煤矸自然射线辐射规律及识别研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
ZHANG Ningbo. Study on natural ray radiation law and identification of coal and gangue in fully mechanized caving[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [7] 袁源,汪嘉文,朱德昇,等.顶煤放落过程煤矸声信号特征提取与分类方法[J].矿业科学学报,2020,6(6): 711-720.
YUAN Yuan, WANG Jiawen, ZHU Desheng, *et al.* Feature extraction and classification method of coal gangue acoustic signal during top coal caving[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2020, 6(6): 711-720.
- [8] 张守祥,张学亮,刘帅,等.智能化放顶煤开采的精确放煤控制技术[J].煤炭学报,2020,45(6): 2008-2020.
ZHANG Shouxiang, ZHANG Xueliang, LIU Shuai, *et al.* Intelligent precise control technology of fully mechanized top coal caving face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2008-2020.
- [9] 窦希杰,王世博,刘后广,等.基于EMD特征提取与随机森林的煤矸识别方法[J].工矿自动化,2021,47(3): 60-65.
DOU Xijie, WANG Shibo, LIU Houguang, *et al.* Coal and gangue identification method based on EMD feature extraction and random forest[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(3): 60-65.
- [10] 窦希杰,王世博,谢洋,等.基于IMF能量矩和SVM的煤矸识别[J].振动与冲击,2020,39(24): 39-45.
DOU Xijie, WANG Shibo, XIE Yang, *et al.* Coal and gangue identification based on IMF energy moment and SVM[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(24): 39-45.
- [11] 刘富强,钱建生,王新红,等.基于图像处理与识别技术的煤矿矸石自动分选[J].煤炭学报,2000,25(5): 534-537.
LIU Fuqiang, QIAN Jiansheng, WANG Xinhong, *et al.* Automatic separation of waste rock in coal mine based on image procession and recognition[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(5): 534-537.
- [12] 司垒,王忠宾,熊祥祥,等.基于改进U-net网络模型的综采工作面煤岩识别方法[J].煤炭学报,2021,46(S1): 578-589.
SI Lei, WANG Zhongbin, XIONG Xiangxiang, *et al.* Coal-rock recognition method of fully-mechanized coal mining face based on improved u-net network model[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S1): 578-589.
- [13] 田妍,田丰.放顶煤开采过程煤矸识别技术发展现状及前景[J].煤炭工程,2018,50(10): 142-145.
TIAN Yan, TIAN Feng. Development status and prospect of coal gangue recognition technology in top-coal caving[J]. Coal Engineering, 2018, 50(10): 142-145.
- [14] 郭辉萍,刘学观.电磁场与电磁波.第5版[M].西安:西安电子科技大学出版社,2017.
- [15] 王晓明,陈军芳,倪志盛.微波在非金属材料无损检测中的应用[J].微波学报,2004,20(2): 70-76.
WANG Xiaoming, CHEN Junfang, NI Zhisheng. The Application of Microwave to Nondestructive Testing of Nonmetallic Materials[J]. Journal of Microwaves, 2004, 20(2): 70-76.
- [16] ALBISHI A M, RAMAHI O M. Microwaves-based high sensitivity sensors for crack detection in metallic materials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2017(5): 1-9.
- [17] 王刚,陈雪畅,韩冬阳,等.基于改进Otsu的煤体CT图像阈值分割算法的研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1): 264-271.
WANG Gang, CHEN Xuechang, HAN Dongyang, *et al.* Research on threshold segmentation algorithm of coal CT images based on improved Otsu[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 264-271.
- [18] 李梅,姜展,姜龙飞,等.三维可视化技术在智慧矿山领域的研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(8): 153-162.

- LI Mei, JIANG Zhan, JIANG Longfei, *et al.* Research progress on 3D visualization technology for intelligent mine 术 [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 153–162.
- [19] 王 昕, 丁恩杰, 胡克想, 等. 煤岩散射特性对探地雷达探测煤岩界面的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 34–41.
- WANG Xin, DING Enjie, HU Kexiang, *et al.* Effects of coal-rock scattering characteristics on the GPR detection of coal-rock interface[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 34–41.
- [20] 贾成艳, 常天英, 樊 伟, 等. 太赫兹波穿透煤层的衰减特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 298–302.
- JIA Chengyan, CHANG Tianying, FAN Wei, *et al.* Attenuation characteristics of Terahertz wave penetrating coals[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 298–302.
- [21] 文 虎, 张 铎, 郑学召, 等. 基于FDTD的电磁波在煤中传播特性[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2959–2967.
- WEN Hu, ZHANG Duo, ZHENG Xuezhao, *et al.* Propagation characteristics of electromagnetic wave based on FDTD in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2959–2967.
- [22] 岳 蕾. 电磁波在煤层中的传播规律与全波形概率反演方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- YUE Lei. Study on the propagation law of electromagnetic wave in coal seam and its full waveform probabilistic inversion method [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016
- [23] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.