

# 煤槽无线电波 $Q$ 值成像技术及应用

黄钧辰\*, 庞 瑶, 李锡明, 胡泽安#, 吴荣新

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年2月27日; 录用日期: 2024年3月18日; 发布日期: 2024年4月12日

## 摘 要

无线电波勘探法是煤层工作面地质构造探查的常规地球物理手段之一。无线电波透视法通常采用单一频率的衰减系数进行探测, 成像结果可以有效分析判识地质异常性质等问题, 但不同的无线电波频率会影响衰减系数成像效果。为了更客观地分析判识地质异常性质, 提出了与频率 $f$ 无关的无线电波煤槽品质因子 $Q$ 值参数。基于理论分析, 利用多频透视场强数据和衰减系数参数, 推导了煤岩介质品质因子 $Q$ 的计算公式; 采用有限元数值模拟方法, 模拟分析了透射正常煤层时, 多频无线电波透视场强值、衰减系数及 $Q$ 值特征; 证明了煤槽无线电波品质因子 $Q$ 值不随频率变化。通过实测实验数据分析, 验证了无线电波 $Q$ 值成像方法的有效性, 为多频无线电波探测的理论及应用提供了一个新的思路。

## 关键词

无线电波勘探, 品质因子, 衰减系数, 煤岩模型

# Radio Wave $Q$ Value Imaging Technology and Application in Coal Trough

Junchen Huang\*, Yao Pang, Ximing Li, Ze'an Hu#, Rongxin Wu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Feb. 27<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The radio wave prospecting method is one of the conventional geophysical means to explore the geological structure of coal seam face. The current radio wave perspective method usually adopts attenuation coefficient of a single frequency for detection. Although the imaging effect is good, it

\*第一作者。

#通讯作者。

can effectively analyze and identify the nature of geological anomalies, etc., but different radio wave frequencies will change the imaging effect of attenuation coefficient. In order to analyze and identify the nature of geological anomalies more effectively, a parameter of radio wave coal groove quality factor  $Q$  value independent of frequency  $f$  is proposed. Based on theoretical analysis, the formula of quality factor  $Q$  of coal and rock medium under certain conditions is derived by using multi-frequency perspective field intensity data and attenuation coefficient parameters. Using the finite element numerical simulation method, the characteristics of perspective field intensity, attenuation coefficient and  $Q$  value of multi-frequency radio wave when transmitting normal coal seam are simulated and analyzed. It is proved that the quality factor  $Q$  of coal seam radio wave does not change with frequency. Through the analysis of experimental data, the effectiveness of radio wave  $Q$  value imaging method is verified, which provides a new idea for the theory and application of multi-frequency radio wave detection.

## Keywords

Radio Wave Exploration, Quality Factor, Attenuation Coefficient, Coal-Rock Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煤矿机械化和综合机械化在全国已逐步普及,“有人巡视,无人值守”的智能化精准开采成为我国煤炭工业的发展主流[1]。由于断层、陷落柱、薄煤带等地质异常,影响了煤层回采工作的效率和安全生产[2] [3] [4] [5]。无线电波透视技术因仪器轻便、透视距离较大和探测效果较显著等优势,成为目前煤层工作面内地质构造探查最普遍采用的物探手段之一[6]。现阶段,煤层无线电波勘探主要利用的是透射电磁波在煤岩介质中的衰减特性,该现象是由于介质在电磁场的作用下产生传导、极化和磁化引起的[7] [8] [9],且与地质异常关系密切。因此常采用无线电波的衰减系数 $\alpha$ 来分析和判识地质异常性质等问题。

衰减系数 $\alpha$ 与煤层工作面内地质构造如小断层对无线电波的能量衰减较为敏感,除了考虑断层面的反射效应以外,还应重视煤槽本身的无线电波衰减品质因子变化产生的影响。面对不同电性参数差异的地质异常区,采用不同的无线电波频率会不同程度的影响吸收系数成像结果。由于低频率无线电波穿透效果优良,但其对应的吸收系数成像结果变化幅度小,难以分辨,而高频率无线电波穿透效果不佳但其对应的吸收系数成像结果变化幅度大,更优于辨认地质异常区,故针对不同的地质异常区选择合适的频率成为面临的一大难题。为了减小人为误差,忽略由于频率选择带来的成像结果差异从而更客观地分析判识地质异常,因此本文提出与频率 $f$ 无关的无线电波煤槽品质因子 $Q$ 值参数。

煤-岩体电性各向异性特征会对透射无线电波的衰减系数属性产生明显的影响,进而影响到煤槽的无线电波 $Q$ 值。因此,小构造及其伴生构造可看作煤槽的无线电波 $Q$ 值异常区。利用无线电波场值信号估算煤层 $Q$ 值并进行地质构造解释,在理论上是可行的。基于无线电波衰减理论,推导在煤岩介质模型的品质因子 $Q$ 计算公式,并通过模拟实验模拟在不同频率条件下 $Q$ 值是否发生变化,总体趋势是否一致,通过实测实验来验证 $Q$ 值成像的有效性和可行性。对煤层赋存状况、工作面地质构造及瓦斯积聚区等地质异常体空间位置定位提供技术支撑,为无线电波探测的理论及应用提供了一个新的思路,以期找到更加客观反应煤层工作面地质构造的电磁参数。

## 2. 煤层无线电波衰减及其 $Q$ 值求取

### 2.1. 无线电波衰减规律及存在问题

煤岩介质为导电媒质，在无线电波的传播过程中会伴随传播路径上电阻率、介电常数变化以及磁导率的突变，产生一定的热能损耗；在井下无线电波透视研究中，通常将这种损耗称之为煤(岩)介质对无线电波的吸收作用，即煤(岩)介质的衰减系数  $\alpha$  [10]。鉴于煤(岩)层空间电磁波传播的规律驳杂，为此使用理想均匀空间进行规律性分析：

$$\alpha = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{1}{2\pi f \epsilon \rho} \right)^2} - 1 \right)} \quad (1)$$

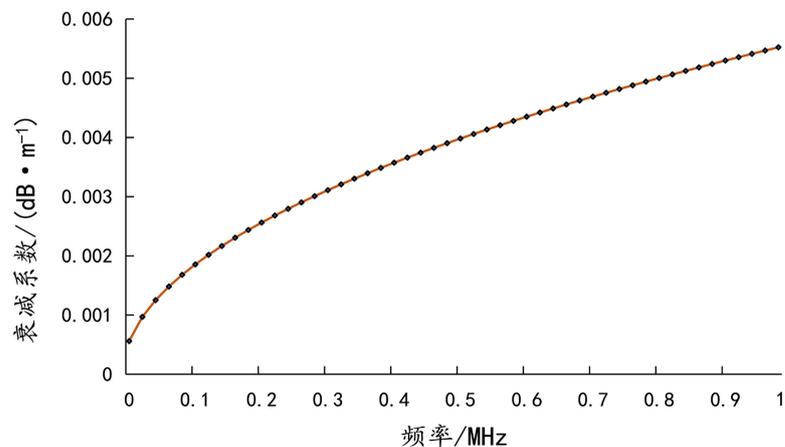
式中  $\rho$  ——电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

$\epsilon$  ——介电常数， $\text{F/m}$ ；

$\mu$  ——磁导率， $\text{H/m}$ ；

$f$  ——频率， $\text{MHz}$ ；

$\alpha$  ——衰减系数， $\text{dB/m}$ 。



**Figure 1.** The relationship between the attenuation coefficient  $\alpha$  and the frequency of electromagnetic waves

**图 1.** 衰减系数  $\alpha$  与电磁波频率函数关系

上述公式的推导基于各向同性介质，当其他电性参数一定时，衰减系数  $\alpha$  与频率关系如图 1 所示。而无线电波透视技术的工况为岩 - 煤 - 岩多层三维各向异性模型，故现阶段对衰减系数  $\alpha$  的理论推导公式并不完全适用。为了在各向异性模型中利用衰减系数有效分析地质异常性质，引入无线电波品质因子  $Q$  值代替衰减系数。

### 2.2. 煤岩层电磁波 $Q$ 值的提出

品质因子是表征电磁波衰减特性的一个重要物理因素， $Q$  值可以定义为系统内储能和耗能的比率，对于各向同性介质  $Q$  值一般可以表示为[8]：

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha v} \quad (2)$$

式中  $v$  ——电磁波传播速度。

当  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \approx 1$  时,  $\alpha \approx \omega\sqrt{\frac{\epsilon\mu}{2}}$ , 衰减系数  $\alpha$  是与频率成正比。

无线电波透视技术中的电磁波类型为较长时间的正/余弦电磁波, 因此不考虑电磁波的传播速度影响, 即假设存在一个  $K$  值 ( $K = \frac{\pi}{v}$ ), 此时煤槽的无线电波  $Q$  值表示为:

$$Q = K \frac{f}{\alpha} \quad (3)$$

因无线电波的发射频率  $f$  已知, 若得到其对应的  $\alpha(f)$  值和  $K$  值, 即可计算出  $Q$  值。

### 2.3. 煤岩层电磁波 $Q$ 值的估算方法

利用实测场强数据求取  $\alpha$ , 以求解  $\alpha(f_1)$  为例, 在均匀煤(岩)介质中确定一发射点, 选取距发射点垂直方向线性距离分别为  $r_1$  和  $r_2$  的两点, 此两点接收场强值为  $H_1$  和  $H_2$ :

$$\begin{cases} H_1 = H_0 - 8.68 \ln r_1 - 8.68\alpha r_1 \\ H_2 = H_0 - 8.68 \ln r_2 - 8.68\alpha r_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $H_0$ ——初始场强值, dB;

$r_1$ 、 $r_2$ ——距发射点距离, m;

$H_1$ 、 $H_2$ ——实测场强值, dB。

由于  $H_0$  相等, 化简公式(4), 可得到:

$$\alpha(f_1) = \frac{H_1 - H_2 + 8.68(\ln r_1 - \ln r_2)}{8.68(r_2 - r_1)} \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(3)即可得到  $Q$  值:

$$Q = \frac{8.68Kf(r_2 - r_1)}{H_1 - H_2 + 8.68(\ln r_1 - \ln r_2)} \quad (6)$$

上述结果可为无线电波勘探提供一个新的应用思路, 可通过提取实测透射无线电波衰减系数变化特征进行线性层析成像, 进而估算煤槽  $Q$  值。若无线电波传播过程中, 遇到断层等地质异常体时, 其衰减系数会增加,  $Q$  值变小[11]。

目前无线电波在煤岩介质中衰减因素不明确, 煤层和围岩的电导率会有显著不同。在默认为均匀介质时, 对实际探测数据处理及理论研究会有一定干扰, 同时现阶段对无线电波的品质因子研究相对较少。因  $K$  值与无线电波传播速度有关, 实际情况中速度变化复杂, 导致  $K$  值不好估算, 故本文中所实际求取的  $Q$  值未加入  $K$  值运算, 结果皆为相对  $Q$  值。

### 3. 煤岩层电磁波 $Q$ 值的验证试验

为验证不同频率除以其对应的衰减系数为一个几乎不变的值, 即证明  $Q$  值存在且不随频率变化而变化, 拟构建有限元二维数值模拟实验。

采用简化的二维层状地质模型, 即岩-煤-岩三层模型, 如图 2 所示; 其中模型总长为 300 m, 高为 100 m, 煤层长 300 m, 采宽 5 m, 上下围岩长为 300 m, 高 42.5 m。发射点为红点(50 m)处, 接收点首点位于 80 m 处, 沿发射点水平方向布置 20 个接收点(黑点), 选择 0.088 MHz、0.158 MHz、0.365 MHz、0.965 MHz 四种工作频率, 模型介质具体参数如表 1 所示。

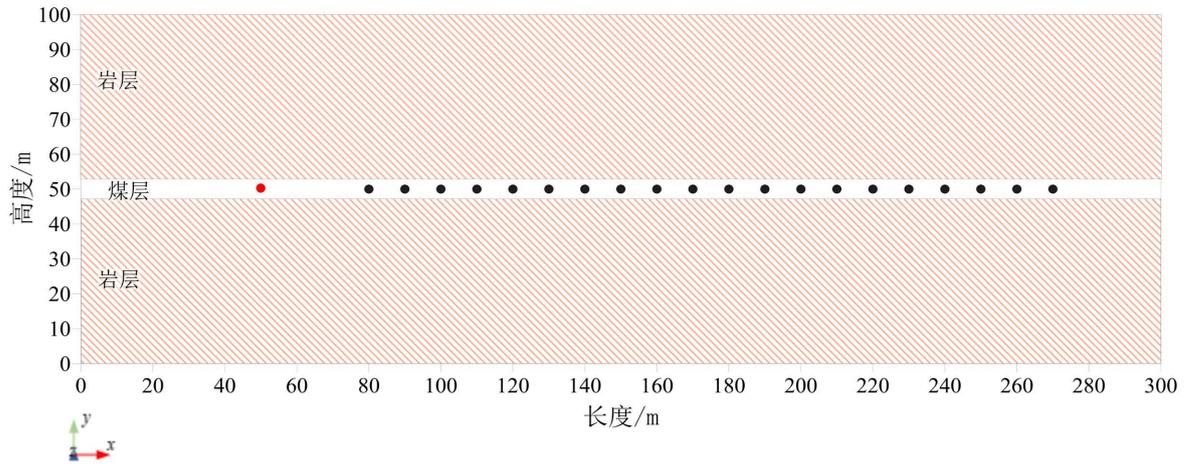


Figure 2. Schematic diagram of the simulated observation system

图 2. 模拟观测系统示意图

Table 1. model medium parameter table

表 1. 模型介质参数表

介质名称	电阻率 $\rho/\Omega\cdot m$	相对介电常数 $\epsilon_r/F/m$
顶底板围岩	100	12
煤层	1000	3

通过上述数值模拟实验，可得到四种频率分别在正常煤层中的四组透射无线电波场强分布曲线，如图 3 所示。图中可以看出随着传播距离的增加，较高频无线电波的场强曲线与低频相比，其能量衰减明显。

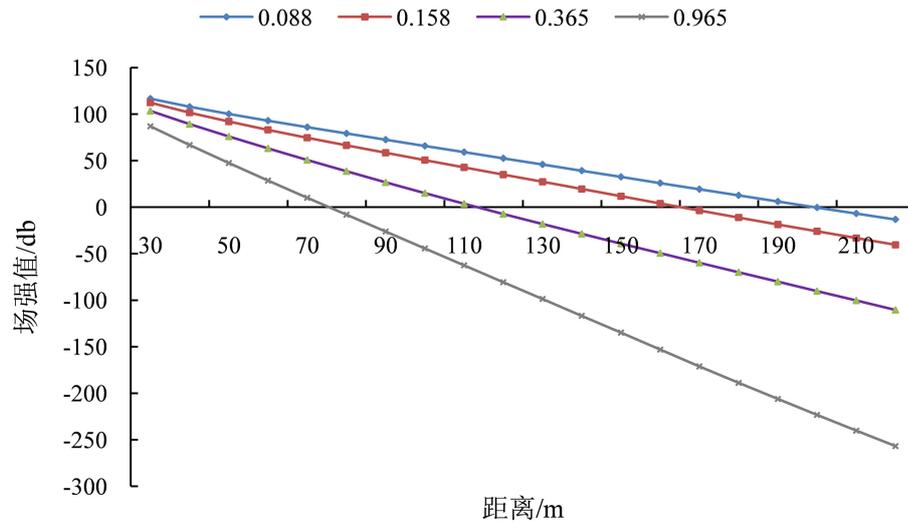


Figure 3. Radio wave field strength attenuation curves at different frequencies

图 3. 不同频率无线电波场强衰减曲线

以  $f_1 = 0.088$  MHz 频率为例，无异常煤层模拟得到 20 组场强数据。为了减小误差，利用公式(5)分别取相邻点数据进行计算，每个频率各得到 19 组衰减系数数据。需要注意的是，在高频段频率与衰减系数

近乎线性关系(不过零点,有斜距),利用公式(6)即可得到相关的  $Q$  值(实际计算时需先给出斜距经验值)。如图 4 所示,在未乘上  $K$  值时,四种频率的  $Q/K$  值基本稳定在 6 左右。

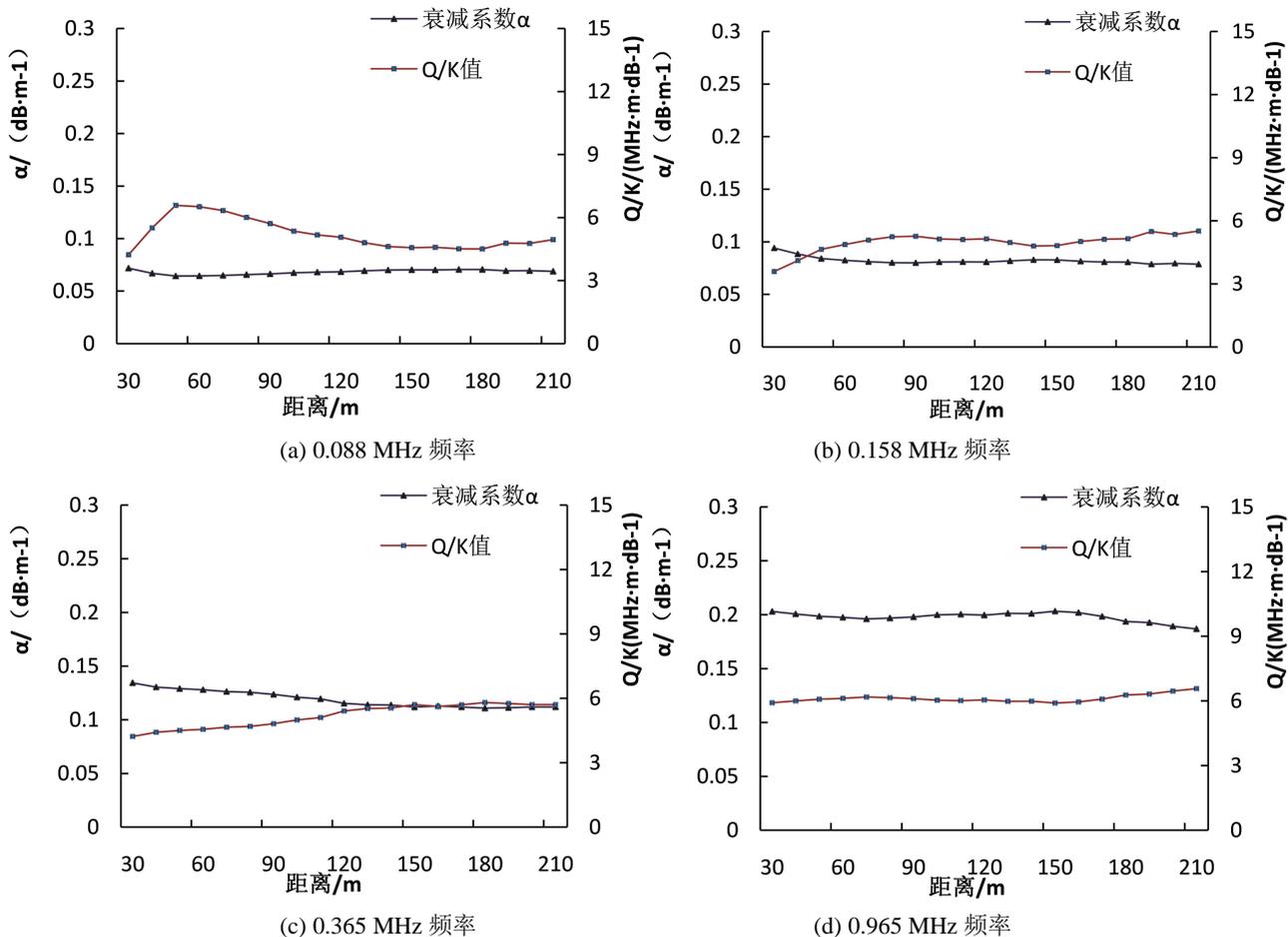


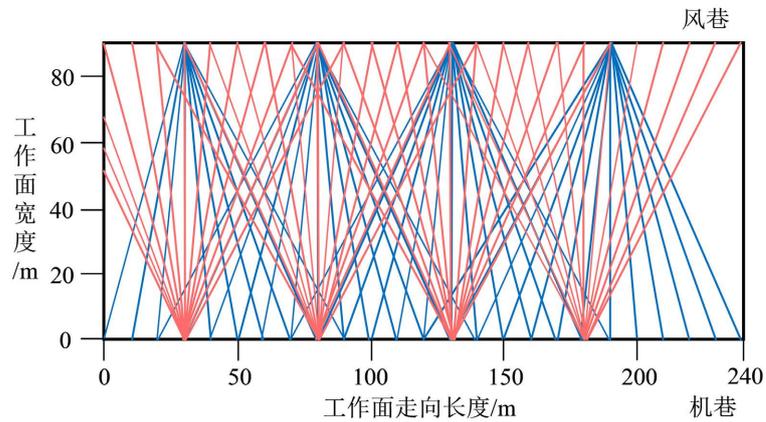
Figure 4. Radio wave numerical simulation data attenuation coefficient and  $Q/K$  value change curve

图 4. 无线电波数值模拟数据衰减系数和  $Q/K$  值变化曲线

在无异常煤层中,四种频率衰减系数曲线无较大差别,均在  $0.3 \text{ dB/m}$  以下,且四种曲线均呈现相同的线性关系,可以看出衰减系数  $\alpha$  在一定条件下可近似成频率  $f$  的正相关函数。四种  $Q$  值曲线趋势基本相同,在未给与  $K$  值的情况下,都可以近似成一条大小相同,趋势统一的直线,进而推出  $Q$  值存在且为一个几乎不变的值。在岩-煤-岩层状地质模型中,理论上  $K$  为常数,若围岩及煤层的各类参数一定,存在对应的唯一  $Q$  值。因为参数  $K$  值不好估算,此时计算出的结果为相对的  $Q$  值,不影响由二维数值模拟模拟实验得出的最终结论。

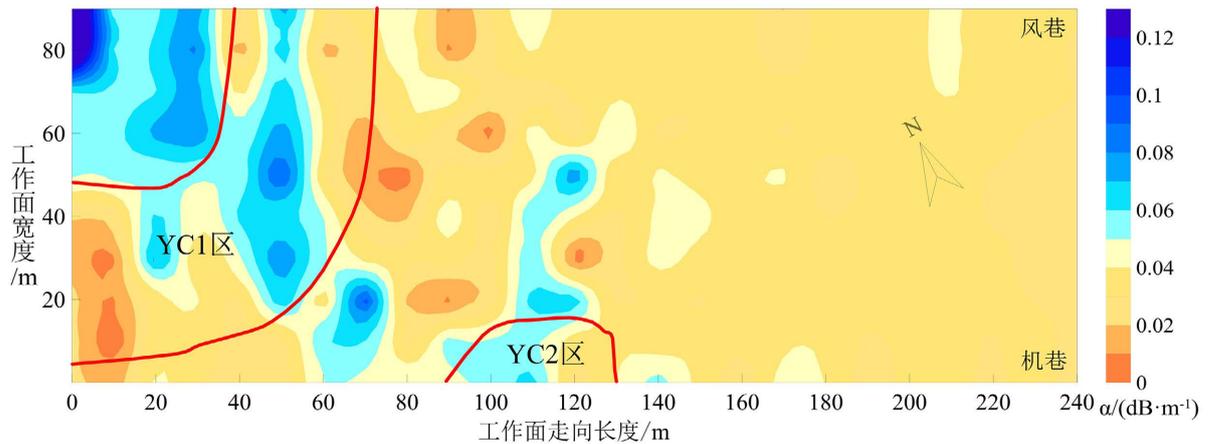
#### 4. 实测实验

为验证煤槽无线电波  $Q$  值的实际存在,在淮南矿区某综采工作面进行了实测试验。该工作面走向长度约  $240 \text{ m}$ ,倾向长度平均约  $90 \text{ m}$ ,平均煤厚约  $4.5 \text{ m}$ 。本实验采用多频无线电波勘探法进行探测,YDT88 型坑透仪的工作频率为  $0.158 \text{ MHz}$  和  $0.965 \text{ MHz}$ 。在机巷共布置 4 个发射点,对每个发射点在风巷接收 13 个实测场强值;在风巷布置 4 个发射点,对每个发射点在机巷接收 10~13 个实测场强值,其中发射点间距为  $50 \text{ m}$ ,接收点间距  $10 \text{ m}$ ,具体现场布置如图 5 所示。

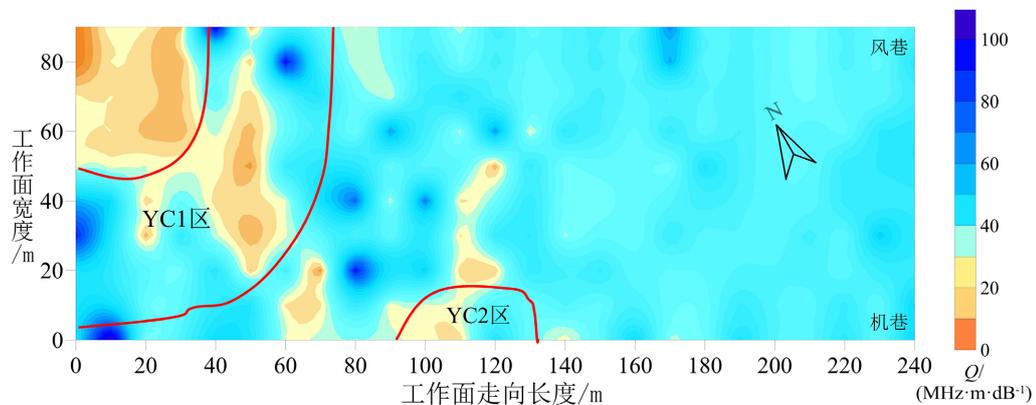


**Figure 5.** Transmitted radio wave actual measurement experimental observation system  
**图 5.** 透射无线电波实测实验观测系统

数据处理采用 ECT2.0 电磁波数据处理系统, 工作面衰减系数数据反演采用 SIRT 法, 提取 0.965 MHz 频率数据反演得到的介质衰减系数成像。如图 6 所示, 数据值大小用不同色标值表示, 其中浅(黄)色调为低电磁波衰减系数值, 冷(蓝)色调为较高电磁波衰减系数值, 在风巷 0~70 m 范围处存在一处衰减系数异常区。



**Figure 6.** Imaging diagram of radio wave attenuation coefficient at 0.965 MHz frequency in coal seam working face  
**图 6.** 煤层工作面 0.965 MHz 频率无线电波衰减系数成像图



**Figure 7.** Relative  $Q$ -value imaging of coal seam working face ( $f = 0.965$  M)  
**图 7.** 煤层工作面相对  $Q$  值成像图( $f = 0.965$  M)

为进一步地验证  $Q$  值成像有效性及相关常数  $K$  存在, 用对应的频率  $f$  和  $K = 1$  对实测透射无线电波数据进行相对  $Q$  值成像, 如图 7 所示, 在 0.965 MHz 频率的无线电波相对  $Q$  值成像中, 其相对  $Q$  值整体分布在 50 左右。在回采验证过的煤厚变薄区(YC1), 呈现出低异常; 在断层异常区(YC2), 呈现出低异常, 与理论和经验相符。异常  $Q$  值的分布区域和发育形态, 与回采验证的地质异常结果吻合度较好, 验证了无线电波  $Q$  值成像的有效性, 取得了良好的实验结果。

## 5. 结论

1) 为消除频率对无线电波衰减系数  $\alpha$  的影响, 引入了煤槽无线电波品质因子  $Q$  值。基于理论分析, 给出了煤槽品质因子  $Q$  值的地球物理依据; 基于数值模拟实验, 验证了煤槽品质因子  $Q$  值的存在且与频率  $f$  无关。

2) 采用电磁波有限元数值模拟和现场试验, 分别计算了衰减系数  $\alpha$  和相对  $Q$  值。通过成像结果分析, 验证了煤槽无线电波  $Q$  值成像方法的有效性, 为无线电波精细化勘探和矿井地质透明化提供了一个新的方法和思路。

## 基金项目

安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2021180); 煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心(安徽理工大学)开放基金资助(EC2022010)联合资助。

## 参考文献

- [1] 吴立新, 汪云甲, 丁恩杰, 等. 三论数字矿山-借力物联网保障矿山安全与智能采矿[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 357-365.
- [2] 张培森, 赵亚鹏, 张明光, 等. 大倾角断层下煤层开采诱发顶底板及附近含水层应力变化规律的试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 60-65.
- [3] 许延春, 曹光明, 张星宇, 等. 推采陷落柱工作面覆岩异常破坏规律研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(3): 268-276.
- [4] 张文泉, 张红日, 徐方军, 等. 大采深倾斜薄煤层底板采动破坏形态的连续探测[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(2): 39-42.
- [5] 宋康磊, 王宏图, 万亮亮, 等. 极薄煤层跨采下伏大巷变形破坏规律研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(3): 49-54.
- [6] 吴荣新, 庞瑶, 胡泽安. 采煤工作面无线电波探测技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2196-2204.
- [7] 刘百祥. 煤矿瓦斯富集区电磁波多频同步 CT 探测技术研究与应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(4): 49-53.
- [8] 刘广亮. 煤岩介质电磁波衰减特性的频率域研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2006.
- [9] 于治会. 分贝及其应用[J]. 电子机械工程, 2002(6): 4-7.
- [10] 刘天放, 李志聘. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 5-37.
- [11] 肖玉林, 吴荣新, 严家平, 等. 工作面坑透场强传播规律及有效透视宽度研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 712-718.