



方位电磁波仪器PeriScope水平井煤岩边界探测特性研究

张意 康正明 冯宏 李飞 李新 韩雪

引用本文:

张意, 康正明, 冯宏, 等. 方位电磁波仪器PeriScope水平井煤岩边界探测特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 158–167.
ZHANG Yi, KANG Zhengming, FENG Hong. Exploration characteristics of coal and rock boundary in horizontal well with Azimuth electromagnetic wave instrument PeriScope[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 158–167.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1089>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿智能化开采煤岩识别技术综述

Review on coal and rock identification technology for intelligent mining in coal mines

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 1–26 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c515aa3f-5580-4fa4-ae27-c920541b395a>

复杂煤体结构煤储层水平井复合管柱完井方法研究

Study on horizontal completion with composite tubular string in coal reservoir with complex coal structure

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 189–197 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1659>

淮南矿区煤层顶板分段压裂水平井抽采技术及效果研究

Study on technology and effect of gas extraction in horizontal well with segmental hydraulic fracture in roof of coal seam in Huainan mining area

煤炭科学技术. 2024, 52(4): 155–163 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1937>

瓦斯富集区多频电磁波CT同步透视技术研究

Research on multi-frequency electromagnetic wave CT synchronous penetration technology in gas abundance zone

煤炭科学技术. 2019(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a1e24a73-74db-41d8-8990-0c0162d6cb43>

煤层气水平井井型结构分析及钻完井技术优化

Analysis on well type structure and optimization of associated drilling technology of CBM horizontal wells

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0ba95d16-0798-4366-b6f0-3029133ac398>

地-井瞬变电磁法线性导体正演及异常响应特征研究

Study on linear conductor forward modeling and characteristics of abnormal response in ground-well TEM

煤炭科学技术. 2019(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4734b40b-8350-4948-98fa-3e392ba58a92>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

张意,康正明,冯宏,等.方位电磁波仪器 PeriScope 水平井煤岩边界探测特性研究[J].煤炭科学技术,2023,51(6):158-167.

ZHANG Yi, KANG Zhengming, FENG Hong, *et al.* Exploration characteristics of coal and rock boundary in horizontal well with Azimuth electromagnetic wave instrument PeriScope[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 158-167.

方位电磁波仪器 PeriScope 水平井煤岩边界探测特性研究

张意¹,康正明²,冯宏¹,李飞²,李新³,韩雪⁴

(1.中煤科工集团西安研究院(集团)有限公司,陕西西安 710054;2.西安石油大学电子工程学院,陕西西安 710065;3.中国石化石油工程技术研究院,北京 100101;4.中国石油集团测井有限公司,陕西西安 710077)

摘要:在煤矿生产中,预先、精准识别煤岩界面能够提高采出率、降低开采风险,是实现煤炭智能化开采的卡脖子技术之一。方位电磁波测井仪器具有较大探测深度和方位分辨能力,其在煤岩界面测井方法中具有一定优势,为了研究油田方位电磁波仪器 PeriScope 在煤田测井中的适用性,建立了煤矿测井水平分层地层模型,使用广义反射系数法和有限元数值模拟方法,以方位电磁波仪器 PeriScope 为例,考察了其对于煤层边界的探测特性。应用 PeriScope 仪器的发射频率和源距组合,设置其仪器半径为煤矿钻杆的常用半径,模拟结果显示,地质信号在界面处的响应符合典型特征,地质信号随仪器旋转角变化具有周期性响应规律,频率和探边距离非简单正相关关系,源距和探边距离具有正相关关系,地质信号幅值随煤层层厚的增加而增加,但层厚增加到一定值后地质信号不再随层厚变化,偏心距较大时地质信号受偏心距影响,方位电磁波测量响应能够反映采空区的电阻率变化。结果表明,地质信号对煤岩边界的探测能力受频率、源距、电阻率对比度、层厚等多种因素影响,方位电磁波仪器 PeriScope 的地质信号具有方位分辨能力,能够用于探测模型设置的煤岩分界面和识别采空区,但对于围岩和煤层电阻率均较高的情况,需要增加仪器的源距或选取合适的发射频率,以满足测量信号强度要求。

关键词:方位电磁波测井;煤岩界面识别;水平井;正演;煤矿智能化

中图分类号:P631

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)06-0158-10

Exploration characteristics of coal and rock boundary in horizontal well with Azimuth electromagnetic wave instrument PeriScope

ZHANG Yi¹, KANG Zhengming², FENG Hong¹, LI Fei², LI Xin³, HAN Xue⁴

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China;; 2. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;; 3. SINOPEC Petroleum Engineering Technology Research Institute, Beijing 100101, China;; 4. China Petroleum Group logging Co. Ltd, Xi'an 710077, China)

Abstract: In coal mine production, advance and precise identification of coal-rock interface can improve recovery and reduce mining risk, which is one of the bottleneck technologies to realize intelligent coal mining. Azimuth electromagnetic wave logging instrument has larger detecting depth and the azimuth resolution ability, which has a certain advantage in coal-rock interface detection, in order to study the oil the applicability of the azimuth electromagnetic wave instrument PeriScope in coalfield well logging, coal log level layered formation model was established, using the generalized reflection coefficient method and finite element numerical simulation method, Taking PeriScope as an example, the detection characteristics of coal seam boundary are investigated. Application of PeriScope instrument transmitting frequency and spacing, set its instrument radius drill pipe radius of the commonly used for coal mine, the simulation results show that the geological response in line with the typical characteristics of signals in the interface, geological signal change with instrument rotation

收稿日期:2022-06-09

责任编辑:常琛

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-1089

基金项目:陕西省秦创原引用高层次人才创新创业人才资助项目(QCYRCXM-2022-260);陕西省教育厅重点科学研究计划资助项目(22JY053);陕西省重点研发计划资助项目(2023-YBGY-111)

作者简介:张意(1986—),男,新疆伊宁人,工程师,博士研究生。E-mail: yizhang86@163.com

通讯作者:康正明(1989—),男,陕西靖边人,讲师,博士。E-mail: 190720@xsyu.edu.cn

Angle with periodic response, frequency and delineation of distance is not a simple positive correlation, spaced and offset distance have positive correlation, The geological signal amplitude increases with the increase of coal layer thickness, but when the thickness increases to a certain value, the geological signal does not change with the thickness. When the eccentricity is large, the geological signal is affected by the eccentricity, and the azimuth electromagnetic wave measurement response can reflect the resistivity change of the goaf. Results show that the geological signal detection ability of the coal rock boundary by frequency resistivity contrast, layer thickness, spacing, and a variety of factors, such as electromagnetic wave instrument Periscope bearing geological signal has the azimuth resolution, can be used to set of coal rock interface detection model and identification of mined-out area, but in the case of surrounding rock and coal seam resistivity are high, It is necessary to increase the source distance of the instrument or select the appropriate transmission frequency to meet the requirements of the measurement signal intensity.

Key words: azimuthal electromagnetic logging; identification of coal-rock interface; horizontal well; forward; intellectualization of coal mine

0 引 言

我国煤炭开采方法已经逐步普及自动化并进入智能化开采发展阶段^[1-2]。近年来,我国煤炭开采工况条件和地质环境趋于复杂化,传统的记忆截割法已经无法满足煤层突变工况的开采需要,煤岩界面的预先、精准识别成为实现智能化开采,提高开采效率和降低成本的关键技术之一^[3-5]。目前,“三机”(工作面采煤机、刮板输送机、液压支架)控制精度已达厘米级,但现有煤岩界面探测方法无法满足煤矿开采的精度要求^[6-7],而在煤岩界面的直接和间接探测方法中,钻孔测量方法由于能直接(穿层孔测量)或间接(顺层孔测量)探测煤岩分界面,且相对其它采前探测方法,测井方法的测量精度较高(能够达到厘米级的界面划分精度),其仪器发展和资料解释对煤岩识别意义重大^[8]。

方位电磁波电阻率测井仪在钻孔测量方法中具有一定优势。相对于自然伽马(探测范围浅,约 50 cm)、密度(对人体有一定的伤害,放射源安全管理复杂,使用不便)^[9]、雷达(目前未发现具有方位分辨能力的孔中装备)、视频方法(测量孔必须穿过煤岩界面)、声波方法(存在声耦合问题,干孔中应用效果较差,且现有声波测井方法很难分辨岩性界面方位)等孔中探测方法,方位电磁波电阻率方法具有探测范围大(根据所使用的源距和频率,探测范围可达 3~30 m),能够分辨方位,探测岩性分界面和用于随钻工况环境,其在石油地质导向中取得较好应用效果,但针对煤矿测量环境的方位电磁波研究较少^[10-11],而相对于油田测量环境,煤田测量环境具有:煤层电阻率高、仪器直径较小、仪器作业的安全要求高等特点。因此,发展适用于煤田测量环境的方位电磁波仪器,能够利用超前钻孔、探放水孔和瓦斯抽放孔探明煤岩分界面,为采煤工作面的透明化提供有力勘探资料。同时能够减少瓦斯突出、水害等地质灾害

的发生、提高生产效率和降低生成成本。

方位电磁波仪器由常规电磁波仪器发展而来,常规电磁波电阻率仪器由 NL 公司率先提出,其发射和接收均为轴向线圈,不具有方位分辨能力^[12]。2005 年, Schlumberger 公司率先提出了随钻方位电磁波测井仪器 PeriScope, 仪器组合使用轴向线圈和倾斜线圈,具有方位分辨和岩性分界面探测能力^[13]。随后各大油服公司也相继推出了各自的方位电磁波测井仪器,如 Baker Hughes 公司的 AziTrak, Halliburton 公司的 ADR 和 Weatherford 公司的 GUIDEWAVE 等^[14-18],尽管仪器参数有所不同,但岩性边界探测能力大致相同^[19]。

笔者针对煤层电阻率的情况,使用广义反射系数法,以 PeriScope 仪器为基础,分析了其线圈系组合在煤田测量环境中受电阻率对比度、频率、源距、层厚等因素的影响;并使用有限元方法,分析了 PeriScope 仪器受煤田测井环境中的孔中流体的影响和仪器对采空区探测性能。

1 岩性边界探测原理

1.1 方位电磁波探测原理

PeriScope 方位电磁波电阻率仪器结构示意图如图 1 所示,仪器的两种线圈系能够测量地质信号(也即岩性分界面信号)和电阻率信号,通过计算电磁信号衰减来反应地层电阻率和岩性变化。其中电阻率信号由轴向发射线圈 T 和轴向接收线圈 R_1 和 R_2 组成,电磁波信号的衰减与地层电阻率有关,通过测量 2 个接收处的电势 V_{R_1} 和 V_{R_2} ,将其转化为幅度比和相位差后可计算地层电阻率,计算公式如下:

$$Att = 20 \lg \frac{\sqrt{[\operatorname{Re}(V_{R_1})]^2 + [\operatorname{Im}(V_{R_1})]^2}}{\sqrt{[\operatorname{Re}(V_{R_2})]^2 + [\operatorname{Im}(V_{R_2})]^2}} \quad (1)$$

$$PS = \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}(V_{R_1})}{\operatorname{Re}(V_{R_1})} - \tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}(V_{R_2})}{\operatorname{Re}(V_{R_2})} \quad (2)$$

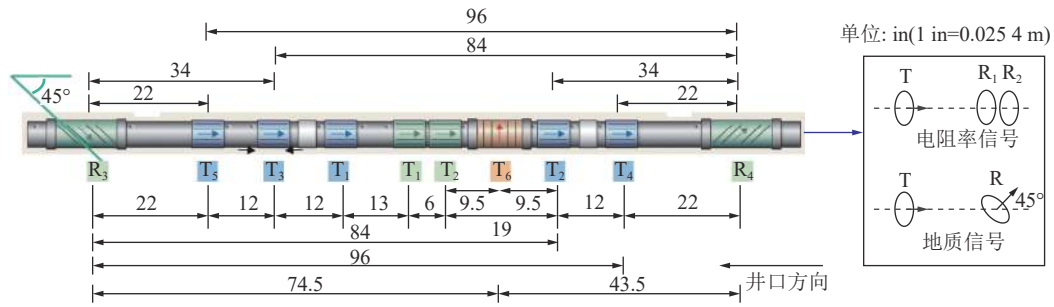


图1 Periscope 仪器结构尺寸^[20]

Fig.1 Periscope instrument construction dimensions^[20]

式中: Att为幅度比, dB; PS为相位差, (°); Re为取电压的实部信号, V; Im为取电压的虚部信号, V。

地质信号由轴向发射线圈 T 和倾斜/径向接收线圈 R 组成(例如图 1 中的 T₅ 和 R₄), 测量时发射线圈中通以交变电流, 交变电流在周围介质中产生交变电磁场, 交变电磁场在岩性界面处产生积累电荷并形成附加电磁场, 附加电场在接收线圈中产生感应电流从而能够被测量, 且接收线圈在仪器沿轴线旋转到不同角度时的法相方向不同, 其测量的附加电场的强度也不同, 实现对地层界面方位的分辨。在使用倾斜线圈或径向线圈测量地质信号时, 较为常用的一种方法是测量倾斜线圈在仪器沿轴线转动到不同方位角 α_1 和 α_2 (或称工具面向角, α_1 和 α_2 可取 0°和 180°)时的接收电动势, 将其转化为幅度比和相位差地质信号, 计算公式如下:

$$\text{Att}_{\text{Geo}} = 20 \lg \frac{\sqrt{[\text{Re}(V_{\alpha_1})]^2 + [\text{Im}(V_{\alpha_1})]^2}}{\sqrt{[\text{Re}(V_{\alpha_2})]^2 + [\text{Im}(V_{\alpha_2})]^2}} \quad (3)$$

$$\text{PS}_{\text{Geo}} = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(V_{\alpha_1})}{\text{Re}(V_{\alpha_1})} - \tan^{-1} \frac{\text{Im}(V_{\alpha_2})}{\text{Re}(V_{\alpha_2})} \quad (4)$$

式中: Att_{Geo}为幅度比地质信号, dB; PS_{Geo}为相位差地质信号, (°)。

1.2 方位电磁波典型响应特征

为研究 PeriScope 仪器在煤层水平井中的探测特性, 建立如图 2 所示的地层模型(其中, θ 为井斜角, ρ_U 为顶板电阻率, ρ_C 为煤层电阻率, ρ_D 为底板电阻

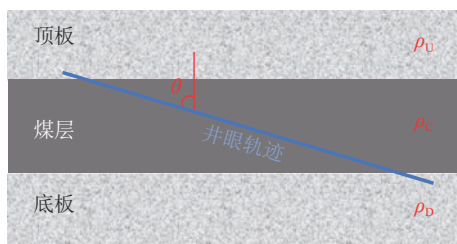


图2 三层地层模型

Fig.2 Three-layers stratigraphic model

率), 并使用参数: 发射匝数 $N_T=100$ 匝, 接收匝数 $N_R=100$ 匝, 线圈半径 $r=0.035$ m, 发射频率 $f=0.4$ MHz, 顶底板电阻率 $\rho_U = \rho_D = 20 \Omega \cdot \text{m}$, 煤层电阻率 $\rho_C = 150 \Omega \cdot \text{m}$ 。电阻率信号使用: 井斜角 $\theta = 0, 45, 85$ 度, 源距 $L_{TR1}=0.889$ m(35 in) 和 $L_{TR2}=1.092$ 2 m(43 in); 地质信号使用井斜角 $\theta = 85^\circ$, 源距 $L_{TR}=2.438$ 4 m(96 in)(1 in=0.025 4 m)。

使用广义反射系数法计算的电阻率信号响应结果如图 3 所示, 幅度比和相位差曲线在远离界面时为恒定值, 且高阻煤层幅度比响应值小于低阻顶、底板, 高阻煤层相位差响应绝对值小于低阻顶、底板; 在井斜角较大时, 相位差响应信号在界面处出现“犄角”; 井斜角对电阻率信号影响可以忽略不计。地质信号模拟结果如图 4 所示, 远离界面位置的地质信

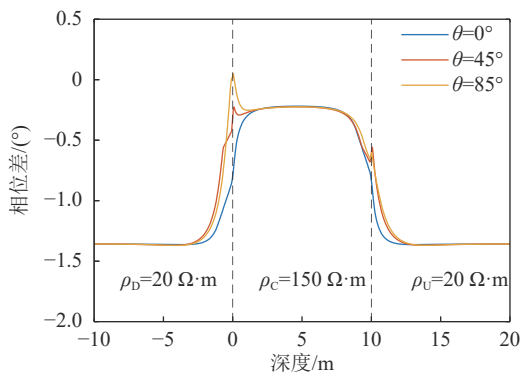
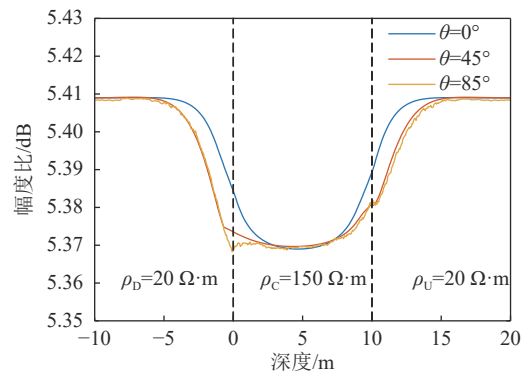


图3 电阻率信号响应特征

Fig.3 Response characteristics of resistivity signal

号幅度比和相位差响应值都接近 0, 仪器越接近岩性分界面响应幅值越大, 在仪器到达岩性分界面处时幅值达到最大值, 且由低阻进入高阻时, 幅度比和相位差响应值为正值, 由高阻进入低阻时, 幅度比和相位差响应值为负值。可以根据地质信号的响应幅值大小, 量化反演仪器与界面的距离。

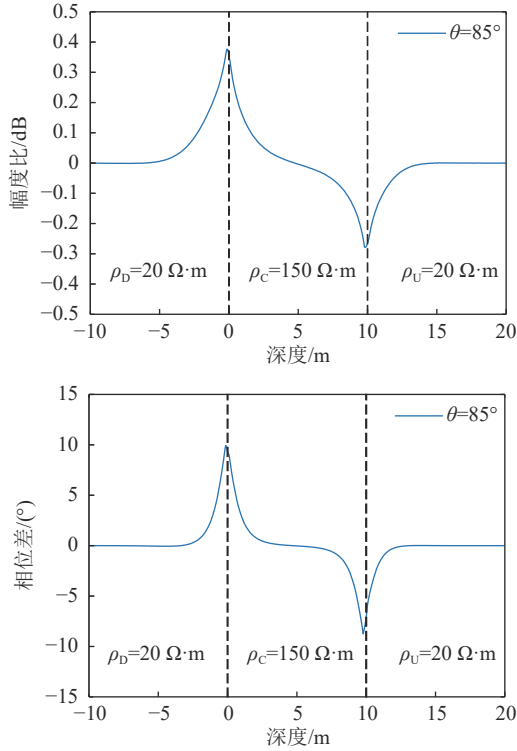


图 4 地质信号响应特征

Fig.4 Response characteristics of geological signal

2 PeriScope 仪器探测性能分析

目前, 未发现针对煤田测井环境设计的商用方位电磁波电阻率测井仪器, 为分析方位电磁波测井在煤田测量环境中的探测特性, 使用商用石油电磁波测井仪器 PeriScope 参数, 在煤田测量环境中, 分析不同影响因素对测量响应的影响, 研究适合煤层使用的电磁测量仪器参数设计。

2.1 方位探测性能

如图 1 所示, PeriScope 方位电磁波仪器存在两种线圈系组合方式, 为分析其对煤岩界面的方位分辨能力, 建立如图 5 所示的两层地层模型, 图中 ρ_s 为围岩电阻率, ρ_c 为煤层电阻率, θ 为井斜角, 使用参数: 发射匝数 $N_T=100$ 匝, 接收匝数 $N_R=100$ 匝, 线圈半径 $r=0.035$ m, 发射频率 $f=0.4$ MHz, 围岩电阻率 $\rho_s=20$ $\Omega\cdot m$, 煤层电阻率 $\rho_c=150$ $\Omega\cdot m$, 井斜角 $\theta=0^\circ$ 、 45° 、 85° , 仪器沿轴线旋转的方位角度 (也称方位面向角) $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$, 电阻率信号使用源距 $L_{TR1}=0.863$ 6 m

(34 in) 和 $L_{TR2}=1.092$ 2 m(43 in), 地质信号使用源距 $L_{TR}=2.438$ 4 m(96 in)。

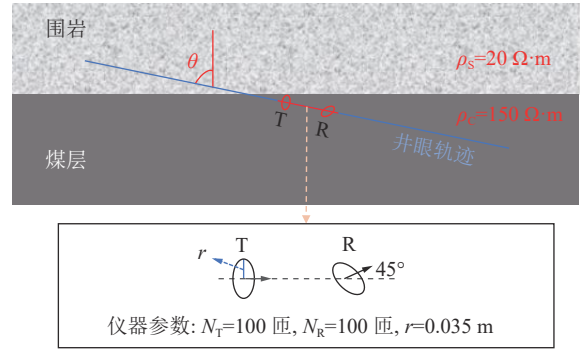


图 5 两层地层模型

Fig.5 Two layer model

根据上述模型, 计算了 PeriScope 仪器地质信号探测特性, 如图 6 所示。可以看出, 随井斜角增加电阻率信号强度有所减弱, 但电阻率信号不随方位面向角变化, 即电阻率信号不具有方位分辨能力, 仅能用于测量地层电阻率; 地质信号在井斜角为 0° 时, 即在直井时没有地质信号, 但随着井斜角的增大, 信号在地层界面附近出现方位指向性, 能够分辨岩性分界面的方位。由于煤田测井中主要关心的是煤岩界面的识别, 下文主要分析 Persicope 仪器的地质信号的探测性能。

2.2 频率与源距对 DTB 的影响

煤矿钻井地质导向和岩性分界面测量, 需要测量仪器具有一定的探测深度, 而地质信号探测距离受频率和源距的共同影响^[19], 为分析其影响, 使用如图 5 所示的参数, 并取井斜角 $\theta=85^\circ$, 发射频率 $f=0.001\sim 1$ MHz, 源距 $L=0.5\sim 35$ m。使用常用幅度比阈值 0.25 dB, 相位差阈值 1.5° , 地质信号最大探边距离 DTB (仪器记录点与界面距离) 随频率和源距变化的 Picasso 图如图 7 所示, 图 7a 为幅度比 DTB, 图 7b 为相位差 DTB。可以看出 DTB 随源距和频率的变化而变化, 在频率和源距都较小时, DTB 趋近于 0, 不同频率-源距组合的探测深度有所不同; DTB 随源距的增加而增加; 但随着频率的增加, DTB 出现非线性变化。对于不同源距, 能够获得最大探测深度的发射频率有所不同, 在仪器设计时需要根据目标地层电阻率对比度计算 Picasso 图, 进而合理选取频率和源距组合。

2.3 电阻率对比度对探边距离的影响

方位电磁波电阻率 DTB 受电阻率对比度影响, 煤层电阻率对比度较大, 且煤层电阻率值较油层高, 本文讨论了高阻情况下的电阻率对比度对方位电磁

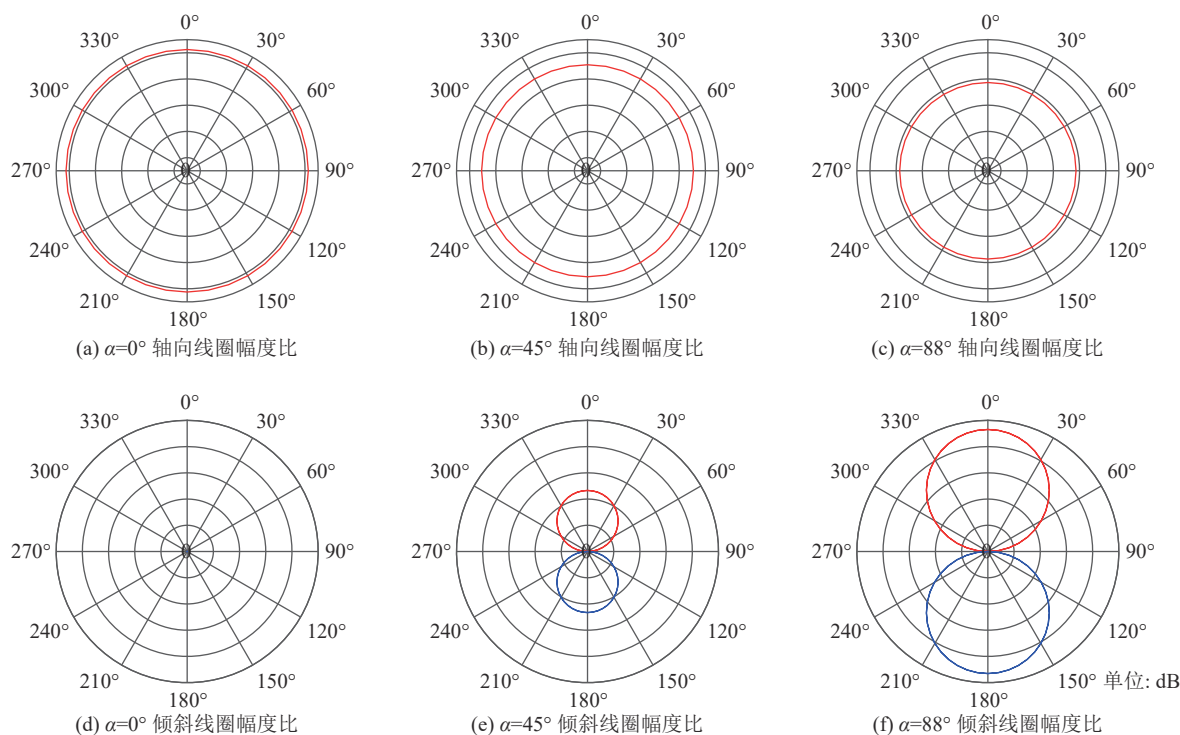


图6 地质信号方位探测特性

Fig.6 Azimuthal detection characteristics of geological signals

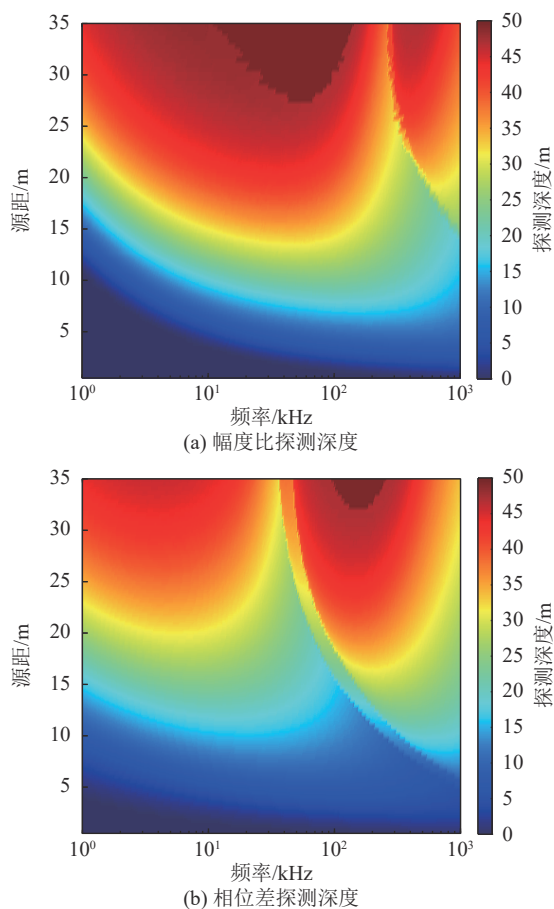


图7 最大探边距离随源距和频率关系

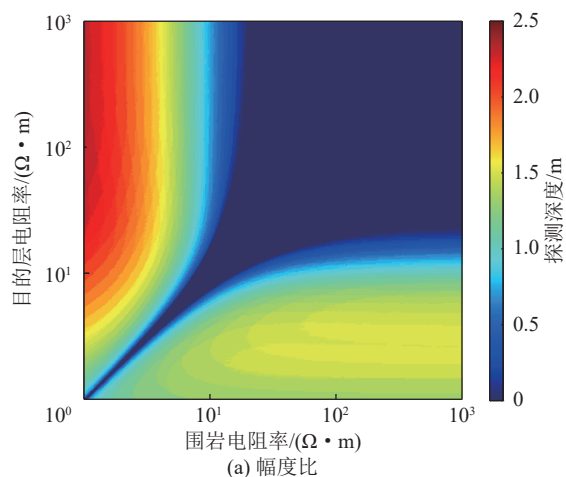
Fig.7 Diagram of maximum probe distance with source distance and frequency

波的影响。使用图5所示的仪器参数,与围岩电阻率 $\rho_s = 1 \sim 1\,000\ \Omega \cdot m$,煤层电阻率 $\rho_c = 1 \sim 1\,000\ \Omega \cdot m$,井斜角 $\theta = 85^\circ$,发射频率 $f = 0.4\text{ MHz}$,源距 $L = 1.092\,2, 2.438\,4\text{ m}$ (43,96 in)。

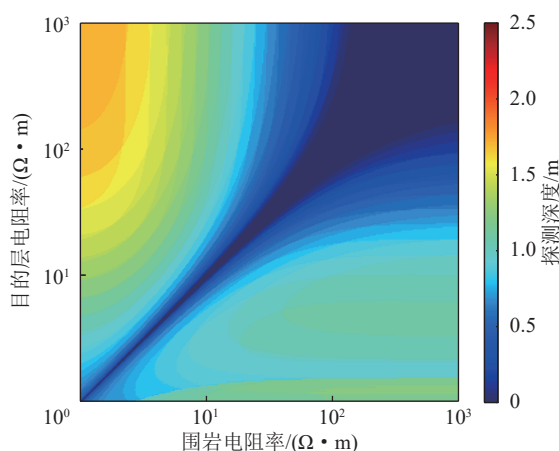
使用幅度比阈值0.25 dB,相位差阈值 1.5° ,地质信号DTB随电阻率对比度变化的Picasso图如图8和图9所示,对于任一子图,左上角表示仪器处在高阻层中,右下角表示仪器处在低阻层中。可以看出,幅度比和相位差信号存在DTB趋近于0的测量盲区(电阻率对比度接近1),且幅度比的探测盲区比相位差大,也即相位差信号电阻率对比度的适应范围广。随电阻率对比度增加,幅度比和相位差信号DTB增加。对于同一源距和频率,幅度比信号的DTB比相位差信号大。发射频率为0.4 MHz时,96 in源距的地质信号电阻率适用范围比43 in源距大,且43 in源距地质信号不适用于围岩和目的层电阻率均大于 $20\ \Omega \cdot m$ 的情况(但可用于围岩或目的层电阻率其中之一大于 $20\ \Omega \cdot m$ 的情况),96 in源距地质信号不适用于围岩和目的层电阻率均大于 $200\ \Omega \cdot m$ 的情况(但可用于围岩或目的层电阻率其中之一大于 $200\ \Omega \cdot m$ 的情况),根据图7所示的结果,若要测量高阻地层,需要增加源距或选取合适的发射频率。

2.4 层厚影响

为对比方位电磁波在不同层厚条件下的响应特



(a) 幅度比



(b) 相位差

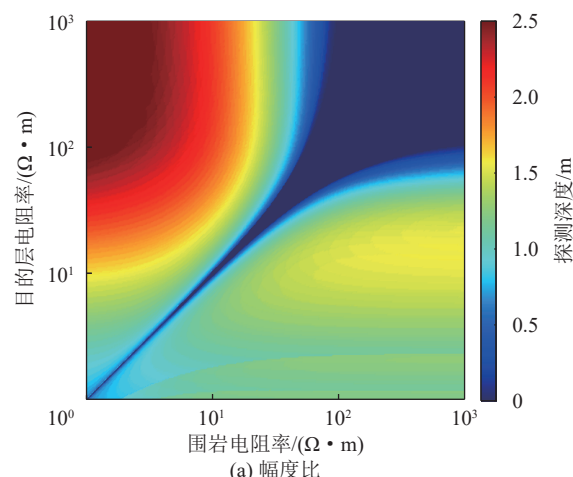
图 8 43 in 边界探测能力随电阻率对比度变化的“Picasso”图
Fig.8 43 in. Picasso map of geological signal boundary detection capability when resistivity varies

性,在煤层与围岩交替出现的地层模型中(图 10 中,灰色填充部分代表高阻煤层,白色填充部分代表低阻围岩层)使用如图 5 所示参数,与井斜角 $\theta = 85^\circ$,发射频率 $f=0.4$ MHz,源距 $L=1.092\ 2, 2.438\ 4$ m (43,96 in),煤层厚度为 $H_c=0.1, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10.0$ m,煤层间的低阻围岩厚度均为 10 m。

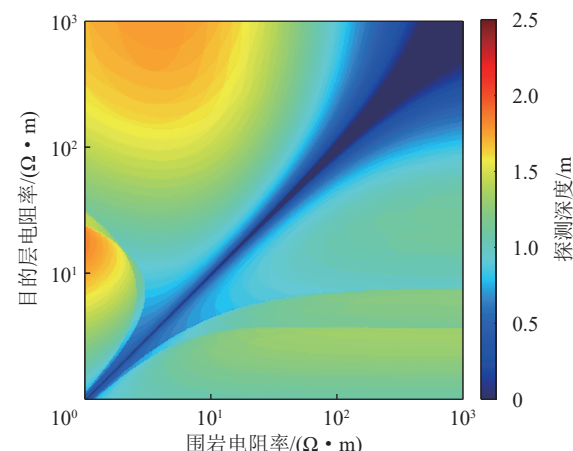
正演模拟结果如图 10 所示,可以看出,在电阻率对比度较高时,即使地层厚度为 0.1 m,地质信号也有较为明显的幅值响应,且地质信号的在界面处的幅值随层厚的增加而增加,但当层厚增加至 3 m 时,界面处的地质信号幅值不再随层厚的增加而增加;仪器在煤层中进行测量时,当煤层厚度较小时,源距较大的地质信号将同时受煤层与顶、底板分界面的影响,而源距较小的地质信号由于探测深度较小,仅受单一煤岩界面的影响,在进行仪器设计时,需要根据目标区煤层的厚度合理选择源距组合。

2.5 钻孔流体的影响

油田钻井主要采用泥浆钻进的方式,煤田钻井



(a) 幅度比



(b) 相位差

图 9 96 in 边界探测能力随电阻率对比度变化的“Picasso”图
Fig.9 96 in. Picasso map of geological signal boundary detection capability as resistivity contrast

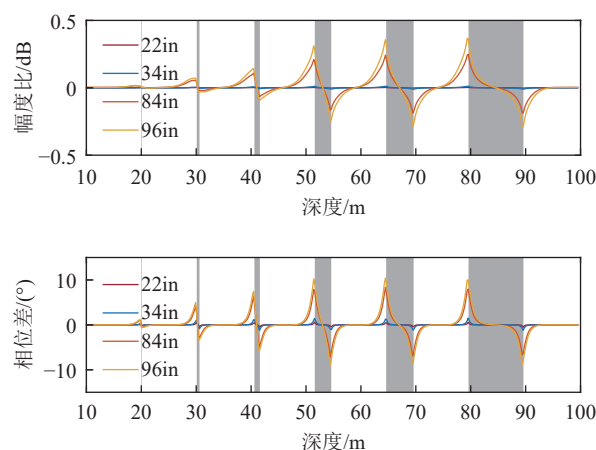


图 10 层厚对地质信号的影响

Fig.10 Effect of the layer thickness on the geological signal

有时也使用风钻等钻进方式。因此,有的井孔在测量时充满泥浆/水,有的井孔内没有泥浆而是空气,还有的井孔因煤层渗流出的地层水,井孔内一半是水一半是空气,本文讨论了钻孔内流体对方位电磁波

测量响应的影响。

建立如图11所示的地层模型,并使用如图5所示的仪器参数,与钻孔半径 $r_B=0.05$ m,煤层电阻率 $\rho_C=150\ \Omega\cdot\text{m}$,钻孔中井斜角 $\theta=90^\circ$,方位面向角 $\varphi=0^\circ$,发射频率 $f=0.4$ MHz,源距 $L=0.558\ 8, 0.863\ 6, 2.133\ 6, 2.438\ 4$ m (22,34,84,96 in),煤层厚度 $H=5$ m。当仪器居中时(偏心距 Offset=0),无钻孔、充水孔、空气孔和一半为水一半空气孔的有限元方位信号响应模拟结果如图12所示,在模型所设置的参数情况下,当井径较小且仪器居中时,无论钻孔中填充的是水或空气,其对方位信号的影响可以忽略不计。

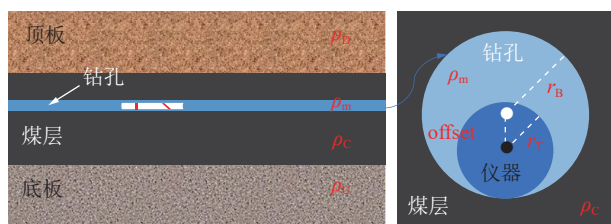


图11 含钻孔三层地层模型示意

Fig.11 Schematic diagram of the three layer formation with drilling hole

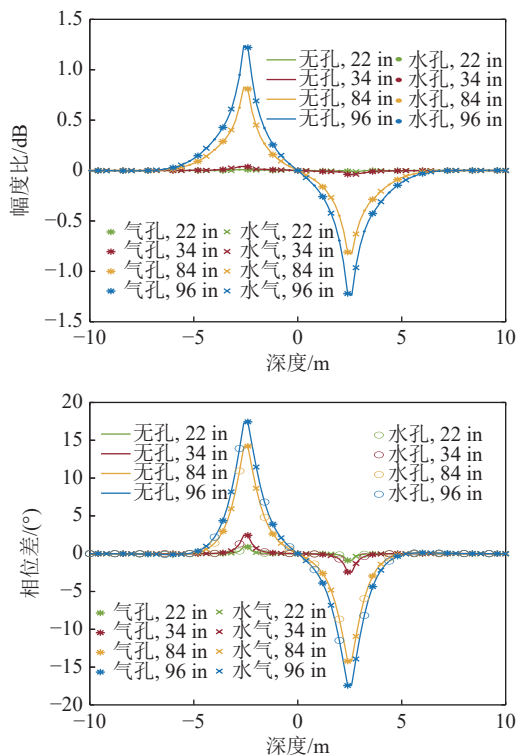


图12 仪器居中时钻孔流体对地质信号的影响

Fig.12 Influence of borehole fluid on geological signal when instrument is centered

但当仪器偏心、且井眼较大时,由于钻孔中的流体相对仪器轴具有不对称性,其产生的磁场也将发

生变化,其他参数不变时,取 $r_B=0.10$ m, offset=0.064 m,方位信号测量响应如图13所示,可以看出,相位差信号在远离界面位置处的响应值不趋近于0,给界面位置的判别和反演带来了一定困难,需要对测量信号做井眼影响校正,幅度比信号在此模型参数时受井孔流体的影响较小。

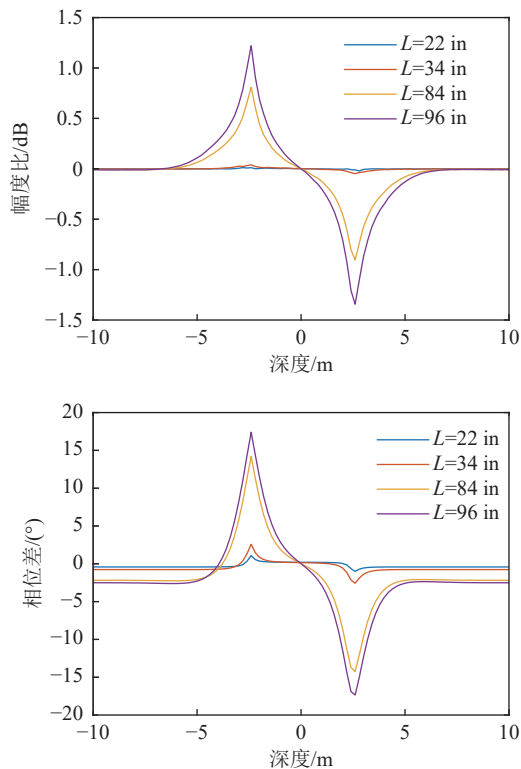


图13 仪器偏心时钻孔流体对地质信号的影响

Fig.13 Influence of borehole fluid on geological signal when instrument is eccentric

2.6 采空区

当矿区内存在采空区时,人员与机械设备都可能掉入采空区内部受到伤害,且遇到老窑水时有可能发生透水事故,使矿山生产面临安全风险,本文讨论了方位电磁波地质信号对采空区的探测性能。

建立如图14所示的采空区正演模拟地层模型,其中 ρ_C 为煤层电阻率, ρ_E 为采空区电阻率,T为发射线圈,R接收线圈,仪器保持水平姿态沿Z轴方向测量。使用如图5所示的仪器参数,与煤层电阻率 $\rho_C=150\ \Omega\cdot\text{m}$,井斜角 $\theta=90^\circ$,方位面向角 $\varphi=0^\circ$,发射频率 $f=0.4$ MHz,源距 $L=0.558\ 8, 0.863\ 6, 2.133\ 6, 2.438\ 4$ m (22,34,84,96 in);采空区长度 $L_E=10$ m,高度 $H_E=5$ m,宽度 $W_E=5$ m(图14中宽度方向为纸面法线方向)。

采空区电阻率分为3种情况讨论:

①采空区全被地层水填充,设置其电阻率为

$\rho_E = 0.5 \Omega \cdot m$, 其方位信号响应如图 15 所示; ②采空区坍塌但未充水, 设置其电阻率为 $\rho_E = 1\,000 \Omega \cdot m$, 其方位信号响应如图 16 所示。③采空区全被空气填充, 设置其电阻率为 $\rho_E = 10^6 \Omega \cdot m$, 其方位信号响应如图 17 所示。

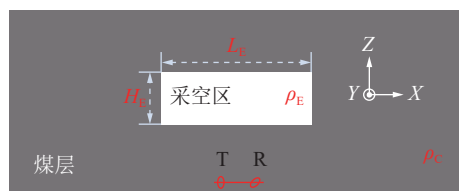


图 14 采空区地层模型

Fig.14 Formation model of goaf

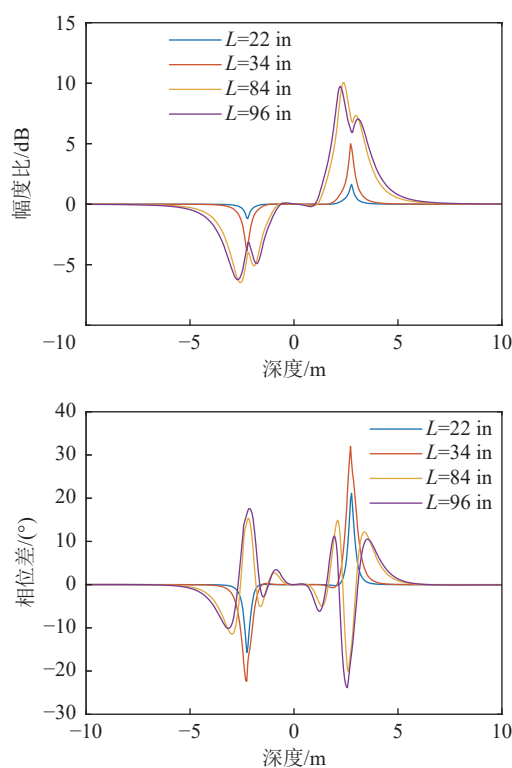


图 15 采空区全充水时的方位电磁波响应

Fig.15 Azimuth electromagnetic response of goaf filled with water

可以看出, 在仪器距离采空区较远时, 无论采空区是高阻或低阻方位信号响应均接近 0。当采空区为低阻(充水)时, 由高阻煤层进入低阻采空区时, 幅度比响应信号幅值增大且为负值, 由低阻水进入高阻煤层时, 幅度比响应信号幅值增大且为正值, 在界面处响应幅值达到最大值; 在源距较短时(22 in, 34 in)相位差响应信号特征与幅度比相同, 但当源距较大时(84 in, 96 in), 相位差曲线在岩性界面附近出现震荡(信号的震荡给界面位置的反演增加了困难), 因此, 幅度比信号对低阻异常体的响应特征优于相位差。当采空区为高阻(充空气)时, 幅度比和相位

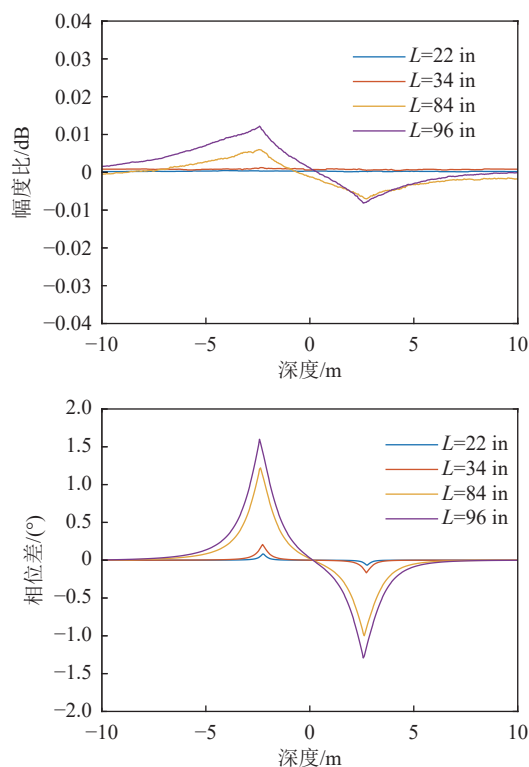


图 16 采空区部分充空气时的方位电磁波响应

Fig.16 Azimuth electromagnetic response of goaf partially filled with air

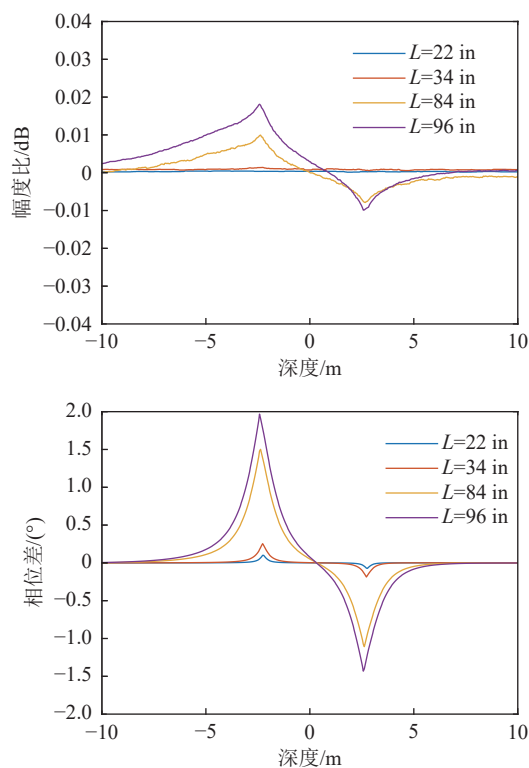


图 17 采空区全充空气时的方位电磁波响应

Fig.17 Azimuth electromagnetic response of goaf filled with air

差信号在岩性界面处的幅值减小, 也即地质信号对高阻异常体不敏感, 且相对于低阻异常体, 幅度比和

相位差信号在高阻异常体边界附近的幅度均有所减小,但幅度比信号减小较相位差信号快,因此,相位差对高阻异常体的响应特征优于幅度比。综上所述,方位电磁波响应信号在高阻和低阻异常体岩性界面附近具有明显的响应差异性,且在低阻异常体界面附近的地质信号幅度较大。

2.7 分辨率

在如图 5 所示的两层地层模型中,使用幅度比阈值 0.25 dB,相位差阈值 1.5°,取有效信号强度的 20% 为仪器能够分辨的最小变化(也即 0.05 dB 和 0.3°),在不同煤层、围岩电阻率,发射频率时,方位电磁波仪器 PeriScope 的最高分辨率见表 1。

表 1 PeriScope 仪器分辨率
Table 1 PeriScope instrument resolution

行号	围岩电阻率/(Ω·m)	煤层电阻率/(Ω·m)	发射频率/MHz	幅度比分辨率/cm				相位差分辨率/cm			
				源距22 in	源距34 in	源距84 in	源距96 in	源距22 in	源距34 in	源距84 in	源距96 in
1	5	50	0.1	—	—	56.5	19.4	—	12.0	12.3	12.0
2	5	50	0.4	—	—	13.7	11.2	4.0	5.4	6.3	5.2
3	5	100	0.4	—	—	13.5	11.2	4.1	5.4	6.3	5.3
4	5	250	0.4	—	—	12.2	11.0	4.0	5.5	6.2	5.3
5	5	500	0.4	—	—	13.0	11.2	4.0	5.5	6.5	5.3
6	5	50	2.0	6.8	6.0	3.5	4.5	3.0	2.7	1.5	1.6
7	20	200	0.1	—	—	—	—	—	—	15.2	15.9
8	20	200	0.4	—	—	56.5	19.4	—	12.0	12.3	12.0
9	20	200	2.0	—	—	11.5	9.2	3.8	5.2	5.5	4.3
10	20	2000	2.0	—	8.0	11.5	9.4	3.7	5.3	5.8	4.2

由表 1 的第 2~5 行可知,同一源距的幅度比和相位差信号分辨率随电阻率对比度的增加变化较小;由第 1、2、6 行可知,仪器的分辨率随发射频率的增加而增加,且相位差信号分辨率高于幅度比信号;在相同电阻率对比度下,随电阻率的增加,地质信号分辨率变化较小(如第 1、2、6 行与第 8、9、10 行对比);分辨率与源距不具有简单的对应关系。综上可知,PeriScope 在不含噪声和常用阈值的理想情况下具有较高分辨率,实际使用时,由于检测能力、噪声水平、环境因素等的影响,其分辨率将有所下降。

3 结 论

1)方位电磁波仪器地质信号,在仪器由高阻进入低阻地层与低阻进入高阻地层时测量信号存在正、负值符号差异,具有方位分辨能力,能够用于识别煤岩分界面和采空区岩性界面。

2)仪器对煤岩界面的探测能力受源距、频率、层厚、电阻率对比度等影响,且当煤层和围岩电阻率均较高时,其他参数不变的情况下,地质信号在岩性分界面附近信号幅值减小,要对高阻情况进行测量,需要增加线圈系源距或合理选择发射频率。

3)电阻率对比度越大,仪器对煤岩界面的探测能力越强,对于同一电阻率对比度,围岩与目的层的

电阻率越低,仪器对煤岩界面的探测能力越强。

参考文献(References):

[1] 葛世荣,郝尚清,张世洪,张幸福,张林,王世博,王忠宾,鲍久圣,杨小林,杨健健.我国智能化采煤技术现状及待突破关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):28-46.
GE Shirong, HAO Shangqing, ZHANG Shihong, ZHANG Xingfu, ZHANG Lin, WANG Shibo, WANG Zhongbin, BAO Jiusheng, YANG Xiaolin, YANG Jianjian. Status of intelligent coal mining technology and potential key technologies in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 28-46.

[2] 程建远,朱梦博,王云宏,等.煤炭智能精准开采工作面地质模型梯级构建及其关键技术[J].煤炭学报,2019,44(8):2285-2295.
CHENG Jianyuan, ZHU Mengbo, WANG Yunhong, et al. Cascade construction of geological model of longwall panel for intelligent precision coal mining and its key technology[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2285-2295.

[3] 程建远,刘文明,朱梦博,余北建,王一,张泽宇.智能开采透明工作面地质模型梯级优化试验研究[J].煤炭科学技术,2020,48(7):118-126.
CHENG Jianyuan, LIU Wenming, ZHU Mengbo, YU Beijian, WANG Yi, ZHANG Zeyu. Experimental study on cascade optimization of geological models in intelligent mining transparency working face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(7): 118-126.

[4] 张 强,张润鑫,刘峻铭,等.煤矿智能化开采煤岩识别技术综

- 述[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 1–26.
- ZHANG Qiang, ZHANG Runxin, LIU Junming, *et al.* Review on coal and rock identification technology for intelligent mining in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2): 1–26.
- [5] 毛明仓, 张孝斌, 张玉良. 基于透明地质大数据智能精准开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 286–293.
- MAO Mingcang, ZHANG Xiaobin, ZHANG Yuliang. Research on intelligent and precision mining technology based on transparent geological big data[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 286–293.
- [6] 刘再斌, 刘 程, 刘文明, 等. 透明工作面多属性动态建模技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2628–2635.
- LIU Zaibin, LIU Cheng, LIU Wenming, *et al.* Multi-attribute dynamic modeling technique for transparent working face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2628–2635.
- [7] 王双明, 段中会, 马 丽, 等. 西部煤炭绿色开发地质保障技术研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 1–6.
- WANG Shuangming, DUAN Zhonghui, MA Li, *et al.* Research status and future trends of geological assurance technology for coal green development in Western China[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 1–6.
- [8] 王 莉, 苏 波. 综采工作面煤岩界面识别方法研究[J]. 中国设备工程, 2020, 21: 215–216.
- WANG Li, SU Bo. Study on identification method of coal-rock interface in fully mechanized Mining face[J]. China Plant Engineering, 2020, 21: 215–216.
- [9] 陈 刚, 范宜仁, 李泉新. 顺煤层钻进随钻方位电磁波顶底板探测影响因素[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 201–206.
- CHEN Gang, FAN Yiren, LI Quanxin. Influencing factors of azimuth electromagnetic wave roof and floor detection while drilling along coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 201–206.
- [10] CHEN G, FAN Y, LI Q. A study of Coalbed Methane (CBM) reservoir boundary detections based on azimuth electromagnetic waves[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 179: 432–443.
- [11] CHEN G, FAN Y, LI Q. Using an azimuth electromagnetic wave imaging method to detect and characterize coal-seam interfaces and low-resistivity anomalies[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2020, 25(1): 75–87.
- [12] PAUL F R, MACMILLAN M W. Electromagnetic wave resistivity MWD tool[J]. SPE Drilling Engineering, 1986, 1(5): 337–346.
- [13] DUPUIS C, DENICHO J M. Automatic inversion of deep-directional-resistivity measurements for well placement and reservoir description[J]. The Leading Edge, 2015, 34(5): 504–506, 508, 510–512.
- [14] LI Q, OMERAGIC D, LARRY C, *et al.* New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling [C]// SPWLA 46th Annual Logging Symposium, New Orleans, Louisiana, 2005: 1–16.
- [15] BELL C, HAMPSON J, EADSFORTH P, *et al.* Navigating and imaging in complex geology with azimuthal propagation resistivity while drilling [C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 2006: 1–14.
- [16] BITTAR M, KLEIN J, BESTE R, *et al.* A new azimuthal deep-reading resistivity tool for geosteering and advanced formation evaluation[J]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2007, 12(2): 270–279.
- [17] BITTAR M, BESTE R, LI S, *et al.* Field testing of a new LWD triaxial sensor for anisotropy and dip measurement in vertical and deviated wells [C]// SPWLA 52th Annual Logging Symposium, Colorado Springs, Colorado, 2011: 1–15.
- [18] LI S, CHEN J, BINFORD T L. Using new LWD measurements to evaluate formation resistivity anisotropy at any dip angle [C]// SPWLA 55th Annual Logging Symposium, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2014: 1–16.
- [19] 王 磊. 深探测多分量随钻电磁波测井理论与正反演研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- WANG Lei. Deep-detection multi-component logging-while-drilling electromagnetic logging: theory, forward modeling and inversion/data Processing[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2018.
- [20] 宋殿光. 随钻电磁波测井仪的数值模拟及地质导向应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- SONG Dianguang. The study on numerical simulation and geosteering application of electromagnetic logging while drilling tools[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.