

文章编号: 1001-1749(2023)03-0372-07

TEM 施工参数的选择研究

娄佰信^{1,2}, 李菊红³, 孙彦良³, 李华峰^{1,2}, 吴陈耿^{1,2}, 李超超^{1,2}, 牛长南^{1,2}

(1. 河南省地球物理空间信息研究院, 郑州 450009;

2. 河南省地质物探工程技术研究中心, 郑州 450009;

3. 河南省地质矿产勘查开发局 第四地质矿产调查院, 郑州 450014)

摘要: 影响 TEM 勘探深度的因素很多, 其中施工参数的正确选择, 对勘探深度和精度有直接地影响。为达到勘探要求, 寻找最佳施工参数, 施工前需在勘探区内开展试验工作, 选取适合工区的最佳施工参数。通过在勘探区已知钻孔资料处开展单一因素变化的噪声调查、发射频率选择、线框尺寸大小选择、发射电流、仪器增益、积分时间的试验工作, 确定适合工区的施工参数。经反演表明, 通过该方法选取的施工参数能够达到勘探深度要求且与已知钻孔揭露地层电性特征一致, 表明通过研究影响勘探深度的因素选取合适的施工参数可以满足勘探深度要求, 为今后运用 TEM 方法进行地质勘探时提供了借鉴。

关键词: TEM; 施工参数; 选择; 研究

中图分类号: P 631.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.12

0 引言

某煤矿采区间发育有较大的断裂构造, 断层两侧地质情况差异明显。采区西北角老窑采空区分布, 现已积水; 当前大巷掘进揭露煤层变薄区, 该处发育有砾岩, 推断由古河流的冲刷所致, 煤层变薄带含(富)水情况不明。以上地质因素对煤层安全开采威胁较大, 需要提前对各主要含水层富水异常范围、断层构造含(富)水性、老窑积水范围开展精细勘探工作, 为采区合理布局及防治水工作合理实施提供技术支撑。

目前, 国内探测和评价含水层富水异常范围、断层构造含(富)水性、老窑积水主要采用高密度电法、电磁法^[1-6]; 高密度电阻率法是一种阵列式勘探方法^[7], 以岩体、土体之间电性差异为前提^[8], 是一种

解决工程地质问题的有效方法, 该方法具有施工快捷, 数据量大, 分辨率高^[9]等优点, 但其勘探深度受施工区的接地及场地条件影响较大^[10], 要取得较大的勘探深度, 需要放置较长的接收电极, 不便于进行大深度勘探工作; 电磁法中 TEM 是一种具有工作效率高, 勘探深度大, 在周围岩体电阻率电性差异较大时成图效果优良^[11]的地质勘探方法, 该方法受周围地质环境影响小^[12], 抗干扰能力较强、灵敏度、信噪比、纵向分辨率高^[13], 同时仪器轻便, 几乎不受场地条件的限制, 适合于在屋密布、接地条件不好、电磁波干扰大的村庄、城镇等地方开展工作, 是探测岩溶、采空区、活动断层的有效手段^[14-15]。综合对比分析各种物探方法, 决定采用 TEM 方法对各主要含水层富水异常范围、断层构造含(富)水性、老窑积水范围开展精细勘探工作。

为达到勘探深度要求, 在已知钻孔资料处开展

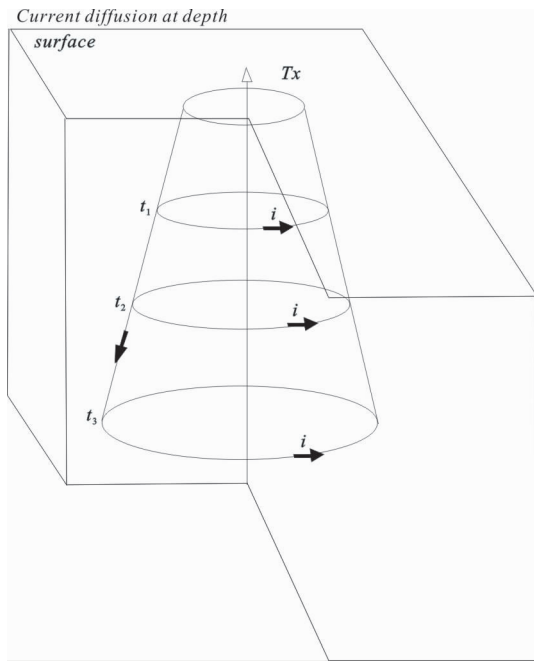


图1 TEM 原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of TEM

试验工作,选取适合本区的施工参数,为后期施工提供技术保证。经试验选取的施工参数与钻孔揭露的地层电性规律一致,说明选取施工参数的方法行之有效,为以后相似工程的勘查提供了参考。

1 勘探原理

TEM 的工作原理是在地表敷设不接地线圈或接地电极,输入阶跃电流。当回线中电流突然断开时,在下半空间激励起感应涡流以维持断开电流前已存在的磁场,并且此涡流场随时间以等效涡流环的形式向下传播、向外扩展,利用不接地线圈、接地电极或地面中心探头观测此二次涡流磁场或电场的变化情况,用以研究浅层至中深层的地电结构。由于是在没有一次场背景的情形下观测纯二次场异常,因而异常更直接、探测效果更明显、原始数据的保真度更高,其工作原理见图 1。

本次施工参数选择试验采用加拿大凤凰公司研发的多功能电法仪 v8 进行。勘探深度的估算公式为式(1)~式(3)。

$$D = \sqrt{500\rho t} \quad (1)$$

式中: D 为估算勘探深度(m); ρ 为背景电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); t 为圆滑曲线最晚采样时间(ms)。

$$t = \mu \left[\frac{(M_t/N_m)^2}{D(\pi\rho_a^L)^3} \right]^{1/5} \quad (2)$$

$$M_t = IL^2 \quad (3)$$

式中: μ 为真空磁导率($4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$); M_t 为发射磁矩($\text{A} \cdot \text{m}^2$); L 为发射线圈边长(m); I 为发射电流(A); ρ_a^L 为估算背景电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); N_m 为实测噪声水平(nT/s)。

根据公式(1)和公式(2)可知,影响勘探深度的主要因素有:背景电阻率、圆滑曲线最晚采样时间(频率大小)、发射磁矩(发射线圈面积、发射电流)、噪声水平、信噪比(增益、积分时间)等,通过单一变量试验改变上述参数,可以选出工区最佳施工参数。

2 工程应用分析

2.1 工程概况

2.1.1 地质概况

勘探区内揭露地层由老到新依次为古生界石炭系(C)、中生界侏罗系中侏罗统西山窑组(J_2x)、新生界下古近系(E)和第四系(Q)。现分述如下:

1)古生界石炭系下统一雅满苏组(C_{1y})。厚度不详,仅在井田范围外东北部少量出露,主要由深灰绿色的安山玢岩、淡红色石斑岩、流纹岩及灰白色—浅红色火山角砾岩、大理岩和变质砂岩等组成。

2)中生界侏罗系中侏罗统西山窑组(J_2x)。勘探区地表未出露,为一套河湖相沉积,岩性为灰色—深灰色砂岩、粉砂岩、泥岩、灰绿色砾岩、砂岩及煤层等。根据钻孔揭露,地层厚度在 40.76 m ~ 195.96 m,平均厚度为 99.17 m。与下伏地层呈不整合接触。

按岩相及岩性的不同分为三个段。

下段:属湖泊沼泽相。岩性以灰色—深灰色砂岩、粉砂岩为主,中夹砾岩及薄层的泥岩、炭质泥岩、菱铁矿和薄煤层等。根据钻孔揭露,该段厚度在 23.43 m ~ 99.34 m,平均厚度为 60.03 m。

中段:属浅湖泊相。岩性以灰色粉细粒砂岩互层为主,夹砾岩、薄层的菱铁矿和炭质泥岩等,含煤 13 层。根据钻孔揭露,该段厚度在 36.07 m ~ 124.27 m,平均厚度为 85.74 m。

上段:属河流相。为一套灰色—灰黄绿色巨厚层状砾岩、砂岩、夹薄层粉砂岩。根据钻孔揭露,该段厚度在 0 m ~ 40.11 m,平均厚度为 14.88 m。

3)古近系(E)。出露于勘探区东部地区,地层厚度呈现由北向南逐渐增厚,东薄西厚。根据钻孔揭露,该层厚度为 149.43 m ~ 326.23 m,平均厚度

表 1 地层电阻率参数表

Tab. 1 Formation resistivity parameters

地层	岩性	视电阻率/ $\Omega \cdot m$
第四系、新近系(Q+N)	黄土、砂质粘土、砾石、细砂、砂砾层、风成砂土、盐碱砂质粘土、泥岩、粉砂岩	30~80
侏罗系西山窑组上段($J_2 x_3$)	泥岩、粉砂岩、煤层	20~100
侏罗系西山窑组中段($J_2 x_2$)	泥岩、粉砂岩、细砂岩、煤层	40~300

为 288.54 m, 南北最大厚度差为 176.80 m。

底部为杂色砾岩与浅红色粘土结核状泥岩组成, 与下伏地层呈不整合接触。

中部分为三组: 第一组由白色—淡红色富含钙质结核之钙质砂岩、砾岩及砾状灰岩组成; 第二组为淡红色砂砾岩, 含钙质结核较多, 砂岩次之, 呈不均一状互层; 第三组以淡红色泥质砂岩为主, 含白色钙质结核夹砾岩。

上部以淡红色泥岩为主, 夹薄层的淡红色砂岩、砾岩。

4) 第四系(Q)。勘探区内广泛分布, 岩性以灰褐、杂色砾石和砂砾石层为主, 夹薄层的砂及亚砂土, 与下伏地层呈不整合接触。

根据钻孔揭露, 该层厚度在 1.00 m~19.63 m, 平均厚度为 9.05 m。

采区间发育有较大的断裂构造, 断层两侧地质情况差异明显。从地震成果来看勘查区内断层较多, 走向 NW、NE、近 SN 向和近 EW 的断层均有发育。

据钻孔资料, 尚未发现岩浆岩侵入中侏罗统西山窑组煤层的现象。煤系基底为流纹岩、石英斑岩、火山角砾岩、凝灰岩等酸性火山岩。

2.1.2 地球物理特征

一般不同的岩石一般具有不同的电阻率, 同一岩石的电阻率的大小在自然环境下并非某一特定值, 而是随特定环境下岩石孔隙中的含水量、温度、深度压力及矿物结构等在一定的范围内变化。正常情况下, 横向上地层电阻率差异较小, 但当局部岩层破碎、裂隙发育时, 电阻率会发生明显变化; 垂向上, 由于地层岩性不同, 通常表现为各层电阻率随岩性及含水的丰富程度而不同。本次勘探区地表起伏不大, 从地层不同岩性的物性差异的角度来分析: 其一般变化规律从泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩、粗砂岩到砾岩, 电阻率值逐渐增高(表 1)。

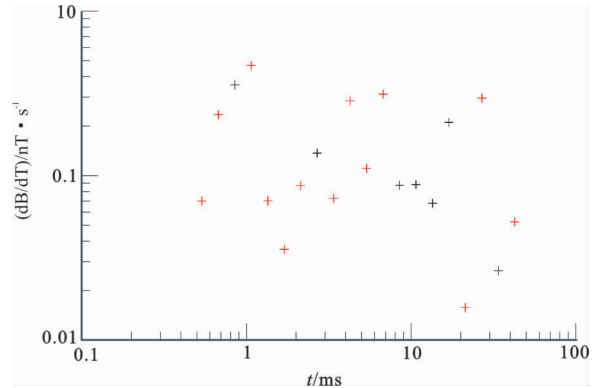


图 2 工区噪声—延时分布图

Fig. 2 Noise—delay distribution diagram of work area

勘探区内地层之间存在明显的电性差异, 具备开展物探工作的地球物理条件。

2.2 施工参数选择

2.2.1 噪声调查

电磁噪声能否被有效压制不仅关系到数据的观测质量, 而且影响到能否满足勘探深度要求, 同时关系到发射磁矩大小和发射频率的选择, 噪声水平调查是进行电法勘探必须进行的工作之一。

图 2 为工区噪声—延时分布图, 红点为正值, 黑点为负值。从图中可以看出该区噪声水平在 0.1 n T/s 上下, 晚期道数据若进入噪声水平范围内则舍弃不用。

2.2.2 频率选择

根据勘探深度要求及干扰情况, 在发射线框、电流、增益及积分时间相同时, 对 5 Hz 和 25 Hz 两个频率进行对比, 5 Hz 与 25 Hz 衰减曲线比较见图 3。

由于早期道的关断时间及采样时长不同, 两个频率观测值早、晚期道有差异外, 中期道的观测值基本一致。25 Hz 和 5 Hz 晚期道数据均处于噪声水平之上。

通过视深度公式(式(4))计算: 25 Hz 勘探深度约为 350 m, 达不到勘探深度要求; 5 Hz 有效勘探

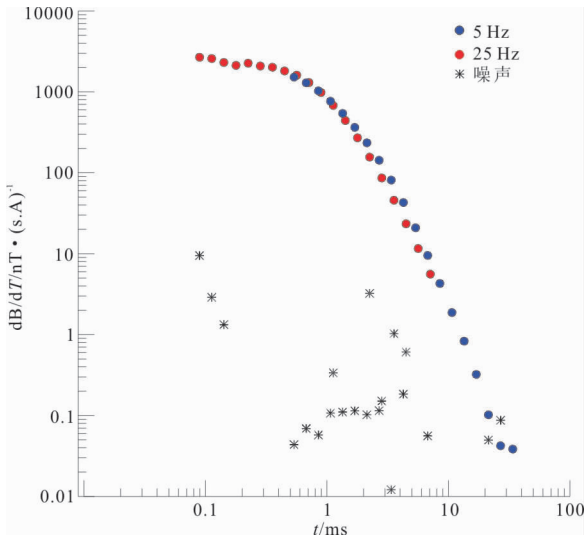


图 3 频率对比曲线

Fig. 3 Frequency contrast curve

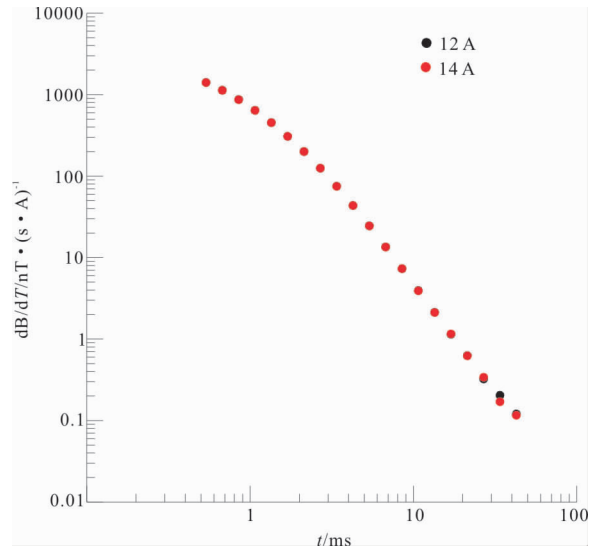


图 5 12 A 和 14 A 对比曲线

Fig. 5 Comparison curves of 12 A and 14 A

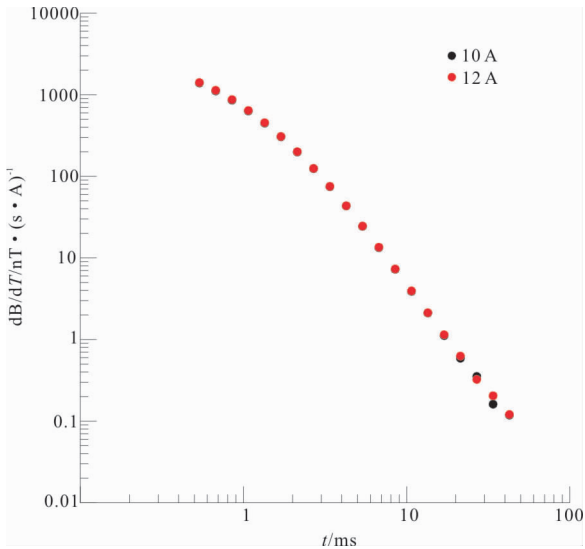
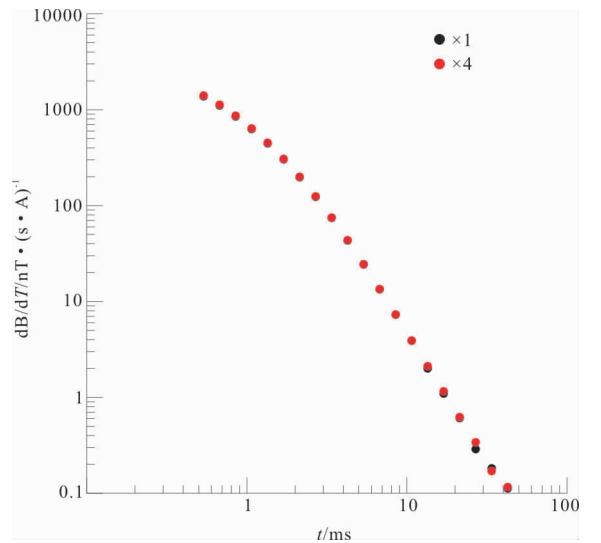


图 4 10 A 和 12 A 对比曲线

Fig. 4 Comparison curves of 10 A and 12 A

图 6 2^0 与 2^2 对比曲线Fig. 6 Comparison curves of 2^0 and 2^2

深度可达 550 m 以上,能够满足勘探深度要求,选择 5 Hz 作为本工区的工作频率。

$$H = 28 \sqrt{\rho_a t} \quad (4)$$

式中: H 为勘探深度, m; t 为取样道时间, ms; ρ_a 为取样道时间 t 时的视电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

2.2.3 电流大小

电流大小同样影响着勘探深度,电流太小相同线框发射磁矩小,压制干扰能力弱,致使晚期道过早的进入噪声水平;电流过大,关断时间较长,减少浅部信息,影响数据的观测精度。在发射频率为 5 Hz 的情况下,保持发射线框、增益、积分时间不变的情况下,分别进行 10 A、12 A 和 14 A 三个电流状态

下的对比试验(图 4~图 5)。

通过对比试验可得:发射电流达到 12 A 时采集的数据稳定性和一致性均较好,晚期道数据没有进入噪声水平范围,能够达到勘探目的层深度。选取 12 A 的电流可达到保证数据采集质量,抑制噪声的效果。

2.2.4 增益

在发射频率为 5 Hz、发射电流 12 A 的情况下,保持发射线框、积分时间不变的情况下,在同一位置,分别采用 2^0 、 2^2 、 2^4 的增益进行数据采集,观测对比结果为:在试验过程中,调整磁道增益($2^0 \sim 2^4$),观察采集界面中的信号范围(峰—峰值),通过

对比分析,选择增益为 2^4 可保证早期道数据不溢

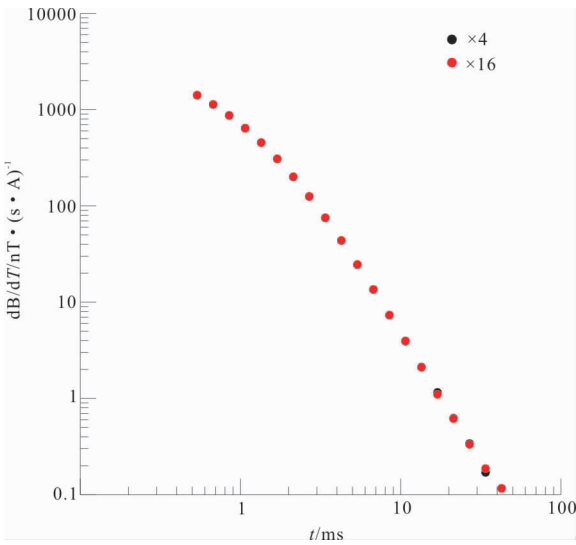


图 7 2^2 与 2^4 对比

Fig. 7 Comparison curves of 2^2 and 2^4

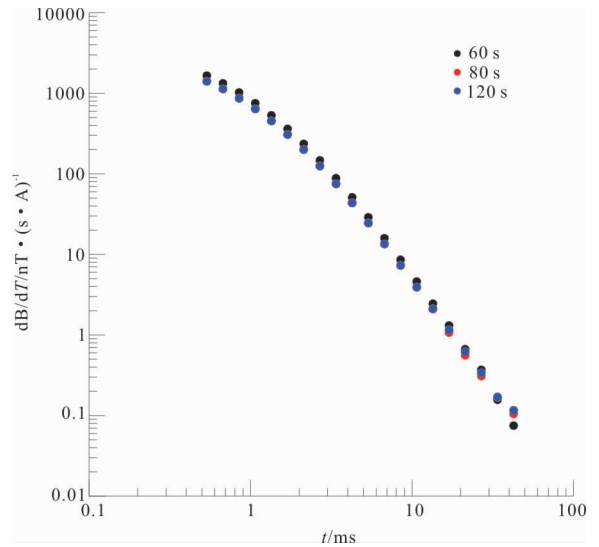


图 8 积分时间对比曲线

Fig. 8 Comparison curve of integration time

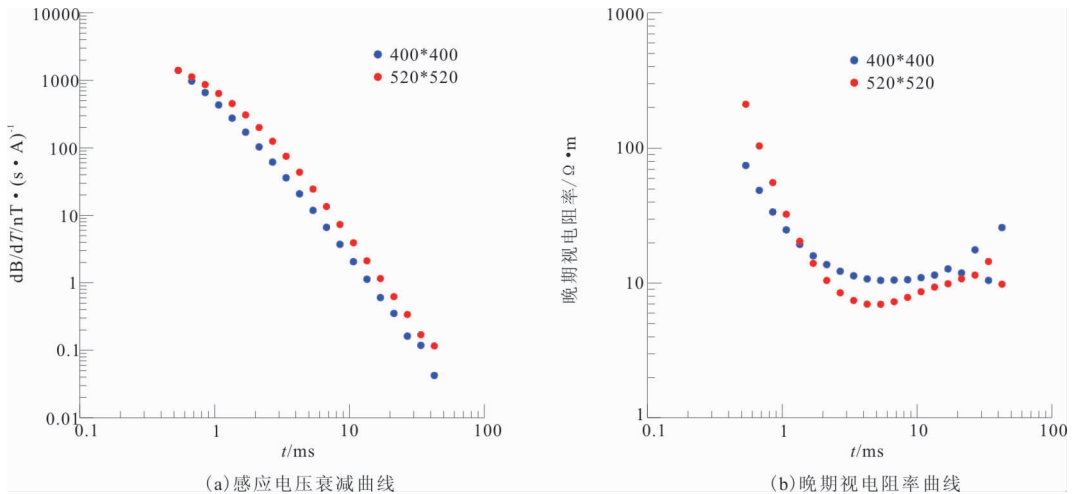


图 9 520 与 400 线框大小对比曲线

Fig. 9 Comparison curve of the size of 520 and 400 wire frames

出、尽量放大晚期数据(图 6~图 7)。

2.2.5 积分时间

从理论上讲,多次叠加对消除人文干扰效果好,图 8 是不同积分时间下的数据对比曲线,120 s 衰减曲线更为圆滑,数据质量好。可选取 120 s 作为本次施工的积分时间,在遇到干扰较大时,适当延长积分时间,增大叠加次数,保障数据采集质量。

2.2.6 发射线框

图 9 是采区发射线框分别为 520 m×520 m 和 400 m×400 m 的感应电压衰减曲线及晚期视电阻率曲线。两种发射线框数据均很稳定,兼顾施工效

率,选择 520 m×520 m 作为采区发射线框。

2.2.7 剖面测量

根据试验所得施工参数,在工区已知钻孔处开展剖面测量。图 10 为 TEM 测线视电阻率断面图,由图 10 可以看出,剖面数据经反演后,能够满足勘探深度要求,煤层采空区表现高阻异常,初步推测该处采空区不富水。

3 结论

为选取施工参数,在勘探区内开展了多项试验工作,所选参数与已知钻孔资料对比,得出以下结

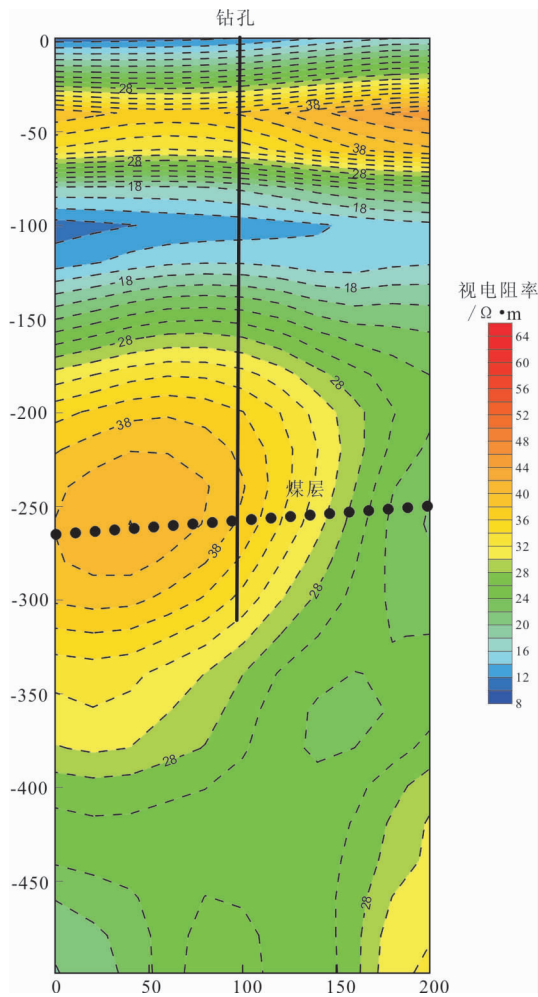


图 10 钻孔附近视电阻率断面

Fig. 10 Apparent resistivity section near borehole

论:

1) 试验剖面与钻探资料对比显示,视电阻率断面与地层电性特征一致,表明所选施工参数能够满足勘探深度要求。

2) 通过施工参数选取试验,能够选择出满足勘探要求的工区最佳施工参数,表明选取参数的方法正确,该方法可以为今后运用 TEM 方法进行地质勘探时,选择工区施工参数提供借鉴。

参考文献:

- [1] 杨建军,吴汉宁,冯兵,等. 煤矿采空区探测效果研究[J]. 煤田地质与勘探,2006,34(1):67-70.
YANG J J, WU H N, FENG B, et al. Research on prospecting effect for gob area of coal mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(1): 67-70. (In Chinese)
- [2] 程建远,孙洪星,赵庆彪,等. 老窑采空区的探测技术与实例研究[J]. 煤炭学报,2008,33(3):251-255.

CENG J Y, SUN H X, ZHAO Q B, et al. Detection technology of excavated region in coal mine and case-study[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(3): 251-255. (In Chinese)

- [3] 韩术合,张寿庭,郭宇飞,等. 多种物探方法在采空区勘查中的应用[J]. 有色金属工程,2017,7(1):76-81.
HAN S H, ZHAN S T, GUO Y F, et al. Application research of integrated geophysical techniques on detecting the mine goaf[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(1): 76-81. (In Chinese)
- [4] 温来福,郝海强,刘志远,等. 综合物探在山西省某煤矿采空区探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(1): 112-117.
WEN L F, HAO H Q, LIU Z Y, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in the detection of coal mined-out areas in Lingshi, Shanxi [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(1): 112-117. (In Chinese)
- [5] 石刚,屈成辉,唐汉平,等. 探地雷达技术在煤矿采空区探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(5): 82-85.
SHI G, QU Z H, TANG H P, et al. Gob detection based on ground penetrating radar technique[J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(5): 82-85. (In Chinese)
- [6] 郭惠恩,刘玉忠,赵炯,等. 综合物探探测煤矿采空塌陷区[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(5): 8-10.
GUO E H, LIU Y Z, ZHAO J, et al. Mine goaf subsidence trough prospected by comprehensive geophysical exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 1997, 25(5): 8-10. (In Chinese)
- [7] 王喜迁,孙明国,张皓,等. 高密度电法在岩溶探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(5): 72-75.
WANG X Q, SUN M G, ZHANG H, et al. Application of high density electrical technique in karst detection [J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(5): 72-75. (In Chinese)
- [8] 江玉乐,张朝霞,周清强. 高密度电阻率法在覆盖层厚度探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2007, 35(3): 69-71.
JIANG Y L, ZHANG Z X, ZHOU Q Q. Application of high density resistivity method to overcast thickness exploration[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(3): 69-71. (In Chinese)
- [9] 董浩斌,王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
DENG H B, WANG C L. Development and application

- of 2D resistivity imaging surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 171-176. (In Chinese)
- [10] 刘晓东, 张虎生, 朱伟忠. 高密度电法在工程物探中的应用[J]. *工程勘察*, 2001(4): 64-66.
LIU X D, ZHANG H S, ZHU W Z. Application of high density electrical method in engineering geophysical exploration[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2001(4): 64-66. (In Chinese)
- [11] 邝金坚, 王鹤, 刘骏华, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在某铅锌矿找矿中的应用[J]. *西部探矿工程*, 2020, 32(10): 139-142.
KUANG J J, WANG H, LIU J H. Application of opposing coils transient electromagnetics method in prospecting for a lead-zinc deposit[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2020, 32(10): 139-142. (In Chinese)
- [12] 高远. 等值反磁通瞬变电磁法对石膏矿采空区的探测分析[J]. *物探与化探*, 2019, 43(6): 1404-1408.
GAO Y. The application effect on detecting goaf of gypsum mine by opposing coils transient electromagnetics method[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6): 1404-1408. (In Chinese)
- [13] 汪勇, 李伟, 朱能发, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在地下构筑物探测中的应用研究[J]. *工程勘察*, 2018(增刊1): 393-397.
WANG Y, LI W, ZHU N F, et al. Application of the OCTEM in underground structures testing [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2018(Sup. 1): 393-397. (In Chinese)
- [14] 彭星亮, 席振铎, 王鹤, 等. 等值反磁通瞬变电磁法在地质灾害探测中的应用对比[J]. *西部探矿工程*, 2018, 30(8): 147-150.
PENG X L, XI Z Z, WANG H, et al. Comparison of the application of opposing coils transient electromagnetics method in geological hazard detection[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2018, 30(8): 147-150. (In Chinese)
- [15] 高远. 等值反磁通瞬变电磁法在城镇地质灾害调查中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(3): 152-156.
GAO Y. The application of opposing coils transient electromagnetics method in geological hazard investigation of town[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(3): 152-156. (In Chinese)

Selection and research on TEM construction parameters

LOU Baixin^{1,2}, LI Juhong³, SUN Yanliang³, LI Huafeng^{1,2},
WU Chengeng^{1,2}, LI Chaochao^{1,2}, NIU Changnan^{1,2}

(1. Geophysical and Spatial Information Institute of Henan Province, Zhengzhou 450009, China;

2. Geology and Geophysics Engineering Technology Research Center of Henan Province, Zhengzhou 450009, China;

3. The Fourth Geological and Mineral Investigation Institute of Henan Geology and Mineral Bureau, Zhengzhou 450014, China)

Abstract: There are many factors affecting TEM exploration depth, among which the correct selection of construction parameters directly impacts exploration depth and accuracy. In order to meet the exploration requirements and find the best construction parameters, it is necessary to conduct tests in the exploration area before construction and select the best construction parameters suitable for the work area. Through the exploration area known borehole data to carry out the single factor changes the noise of the investigation, the choice of transmitting frequency, wire frame size, the emission current, instrument gain, integral time of experimental work, determine the construction parameters of the suitable work area, approved by the inversion shows that the selection of construction parameters method can meet the requirements of exploration depth and consistent with the known borehole reveal electrical formation characteristics. The results show that the appropriate construction parameters can meet the requirements of exploration depth by studying the factors affecting exploration depth and provide a reference for future geological exploration by TEM method.

Keywords: TEM; construction parameters; selection; research