

# 瞬变电磁法在后安煤炭有限公司的实践与应用

王福元

山西朔州后安煤炭有限公司, 山西 朔州  
Email: zlc200802116@163.com

收稿日期: 2020年9月17日; 录用日期: 2020年10月6日; 发布日期: 2020年10月13日

---

## 摘 要

针对山西朔州后安煤炭有限公司90305轨道顺槽探放水的实际情况, 采用了瞬变电磁法进行了物探, 并阐述了瞬变电磁法的工作原理和使用注意事项, 在山西朔州后安煤炭有限公司90305轨道顺槽进行了应用, 收到了良好应用效果, 节约了成本, 保证了掘进工作面安全、高效地生产, 具有很广泛的应用价值。

## 关键词

瞬变电磁法, 实践, 应用

---

# Practice and Application of Transient Electromagnetic Method in Hou'an Coal Co. Ltd.

Fuyuan Wang

Shanxi Shuozhou Hou'an Coal Co., Ltd., Shuozhou Shanxi  
Email: zlc200802116@163.com

Received: Sep. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 6<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 13<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Aiming at the actual situation of 90305 Guidao Shunchao's water detection and release in Shanxi Shuozhou Hou'an Coal Co. Ltd. The transient electromagnetic method was used for geophysical prospecting, and the working principle and precautions of use of the transient electromagnetic method were explained. Hou'an Coal Co., Ltd. 90105 Guidao Shunchao's has been applied, and has received good application results, saved costs, and ensured the safe and efficient production of the driving face, which has a wide range of application value.

## Keywords

### Transient Electromagnetic Method, Practice, Application

Copyright © 2020 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

煤炭在中国能源组成中占主要部分,我国大部分矿井是井工矿,保证煤炭不断供应的核心是矿井安全高效的生产,这其中原煤的高效开采是关键[1]。矿井水灾日渐成为困扰矿井安全生产的主要灾害之一[2]。《煤矿安全规程》规定,当地面不能识别水文地质条件时,应在开采前进行物探、钻探或地球化学勘探等方法,以检查采煤工作面及其周围的水文地质条件[3]。目前探测地下矿井水害广泛使用的方法是通过物探法。该方法对矿井生产影响非常小、成本很低、具有容易操作、安全性高的优势,日渐成为矿山行业普遍采用的方法,甚至成为大部分矿井采煤工作面开始投产前的必要流程[4]。目前矿井下可供使用的物探方法有很多,常用的有直流电法、瞬变电磁法、音频穿透法、无线电波透视法、浅层地震勘探、电磁频率测深法、槽波地震勘探、地质雷达法和 farrell 等方法[5],矿井依据自身实际情况而定。尽管物探方法在使用过程中受到许多因素的影响和限制,导致测试结果常常具有部分局限性[6]。不可否认物探方法的优势在于能够提高勘探项目布局的针对性,能够加快勘探速度,达到勘探工作效率快速提高的目的[7]。但是通常通过物探和间接水勘探获得结果常常不能够当作采掘工程施工的可靠依据,实践工程实践过程中需要执行“物探先行、钻探验证”的标准勘探程序从而达到提高勘探技术水平的目的[8]。在煤矿采掘工作面利用瞬变电磁法进行物探是探放水工作经常用到的一种方法。其目的是为探放水工作提供一个技术支撑和科学依据,然后在用钻探进行验证,这样巡回渐进地做好探放水工作以确保采掘工作面安全、高效地生产。山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司在掘进 90105 胶运顺槽探放水施工时采用了瞬变电磁法进行了物探为探放水的钻探施工工作提供了具有针对性的技术指导,收到了非常好的应用效果。

## 2. 矿井及工作面概况

### 2.1. 矿井概况

山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司行政隶属于平鲁区陶村乡管辖。井田目前开采的是 4<sup>#</sup>煤层、9<sup>#</sup>煤层,面积 4.8336 平方公里,现核定生产能力 500 万吨/年。井田开拓方式为斜立井混合开拓方式,有主斜井、副斜井、行人斜井和回风立井四个井筒。目前矿井通风方法采用的是机械抽出式,通风方式中央分列式,主风机是两台 FBCDZ-10-No30 对旋式轴流风机,一台工作,一台备用,配备电机型号为 YBF630S1-10,功率 280 KW × 2。矿井掘进工作面利用压入式通风,采煤工作面采用全负压通风。矿井通风系统运行正常,矿井风量和各用风地点风量满足矿井生产需要。煤尘具有爆炸危险性,煤层自燃倾向性等级均为 II 级,属于自燃煤层。2019 年瓦斯等级鉴定结果显示,该矿井相对瓦斯涌出量为 0.43 m<sup>3</sup>/t,绝对瓦斯涌出量为 2.95 m<sup>3</sup>/min,属于低瓦斯矿井。矿井采掘机械化程度 100%。目前 9<sup>#</sup>煤层布置 5 个掘进工作面,1 个综采工作面,4<sup>#</sup>煤层布置 1 个综采工作面、1 个掘进工作面。采煤法采用综合机械化放顶煤回采工艺,走向长壁式采煤法,全部垮落法控制顶板。

## 2.2. 工作面概况

90305 轨道顺槽位于井田北部，北部为矿界保安煤柱、南部为 903 采区轨道巷，东部为 90304 胶运顺槽，西部为 90305 工作面实体煤。对应上覆 4<sup>#</sup>煤层为 8501、8502 采空区，90305 轨道顺槽煤层与 4<sup>#</sup>煤层层间距平均 45.15 m。90305 轨道顺槽设计长度为 452.2 m (回风联巷长度为 36.5 m)煤层厚度平均为 12.0 m，煤层倾角为 1°~5°，平均 3°，煤层底板标高为 1129~1135 m。

## 3. 瞬变电磁法的工作原理

### 3.1. 工作原理

瞬变电磁法也称为时域电磁法，简称 TEM。这种方法的原理是通过使用接地的线源或不接地的返回线将脉冲电磁场传输到地面。在脉冲电磁场间隔期间，使用不接地的线圈或接地电极观察次级涡流场的变化，如图 1 所示。实际工作方法是：在矿井的地面或地下位置设置一个发射线圈。线圈可以通过一定的波形电流，在发射线圈周围的空间会产生磁场，在地下导电岩体内会产生相应的感应电流。断电后，由于热量损失，感应电流开始随时间衰减。这个衰变过程通常经历三个阶段：早期、中期和晚期。初始形成的电磁场类似于频域的高频部分，具有快速的衰减率和小趋肤深度；频域的低频部分类似于后期，具有缓慢的衰减速率和相对较大的趋肤深度。通过记录停电后各时间点二次场衰减的变化规律，可以得到不同深度的地电特征。面积为  $S$  的矩形发射回线被铺设在电导率为  $\sigma$ 、磁导率为  $\mu_0$  的均匀各向同性的地表面，回线中被提供阶跃脉冲电流  $I(t)$ ，其中[9]：

$$I(t) = \begin{cases} I & t < 0 \\ 0 & t \geq 0 \end{cases} \quad (\text{式 1})$$

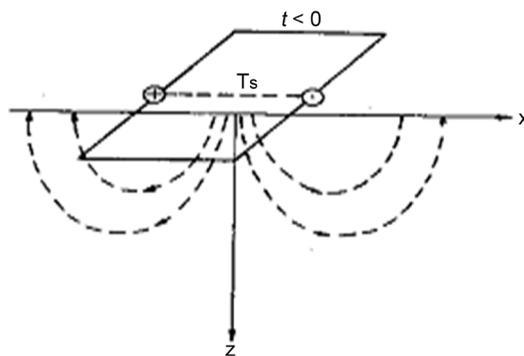


Figure 1. Schematic diagram of the working principle of transient electromagnetic method  
图 1. 瞬变电磁法工作原理示意图

通常在电流断开之前，返回电流周围的地面和空间会形成稳定的磁场。在  $t = 0$  时，电流突然切断，电流产生的磁场也立即消失。通过空气和地下导电介质把一次磁场在这一过程中发生的剧烈变化，它被传输到回路周围的地面，同时，在发射电流断开之前，感应电流在地面被激励以维持回路周围的磁场，从而确保空间中的磁场不会立即消失。这个过程直到介质的热损失消耗了磁场的能量为止。因为电磁场在导电介质中传播的速度比在空气中传播的速度慢，所以当电流被切断时，磁场的急剧变化首先传播到发射线圈周围的地面上的点，因此感应电流第一次通常被限制在表面上。地表不同地点分布的感应电流并不均匀，一次磁场地表处感应电流最强位置往往位于靠发射回线比较近的位置。地下产生的感应电流随时间慢慢向外向下发生扩散，在这个过程中，电流的强度也逐渐减弱，趋于均匀分布。研究结果表明，地下涡流在某一时刻在地表产生的磁场可以近似为类似水平圆形线电流的磁场形状。当传输电流被

切断时，回路导线的电流接近传输回流线，这产生与传输回流线相同的形状。此时，电流回路随着时间向外和向下扩展，并趋向于成为循环电流回路。等效电流回路图像更类似于从发射回路“吹出”的一系列“烟圈”。涡流引起的向上、向下和向外扩散的现象通常被称为“烟圈效应”，如图2所示。

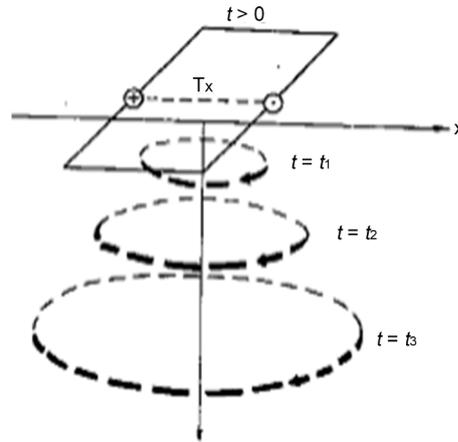


Figure 2. Smoke ring effect diagram of transient electromagnetic field  
图2. 瞬变电磁场的烟圈效应图

“烟圈”的半径  $r$ 、深度  $d$  的表达式[10]:

$$r = \sqrt{8c_2 \cdot t / (\sigma\mu_0 + a^2)} \quad (\text{式 } 2)$$

$$d = 4\sqrt{t/\pi\sigma\mu_0} \quad (\text{式 } 3)$$

式中： $a$  代表发射线圈的半径， $c_2$  为衰减系数  $c_2 = \frac{8}{\pi} - 2$ ， $\sigma$  为电导率， $\mu_0$  为磁导率， $t$  为衰变时间。通常发射线圈半径相对于“烟圈”半径较小情况下，可得  $\tan \theta = \frac{d}{r} \approx 1.07$ ， $\theta = 47^\circ$ ，故“烟圈”将沿  $4^\circ$  倾斜锥面的方向发生扩散，其向下传播的速度为：

$$v = \frac{\partial d}{\partial t} = \frac{2}{\sqrt{\pi\sigma\mu_0 t}} \quad (\text{式 } 4)$$

根据“烟圈效应”这一角度分析，地表附近的感应电流产生早期瞬变电磁场，可以反映浅层的电分布；通过掌握晚期瞬变电磁场随时间的变化趋势，能够探测得出大地电性在垂直方向上产生的变化。

地面瞬变电磁法和矿井采用的瞬变电磁法具有相同的基本原理，测量数据的两种设备、仪器和时间窗是相同的。矿井中使用的瞬变电磁法经常受到勘探范围的限制，这限制了布置的测量线圈的范围，导致勘探深度有限。通常的探测深度约为 130 m。地面使用的瞬变电磁法是半空间瞬变响应法，即地表下半空间地层产生的瞬变响应；与产生全空间瞬变响应的矿井瞬变电磁法相比，通常由环面上、下(或两者都有)地层产生瞬变响应，用这种方法很难确定异常体的位置。在解释工程实践数据时，还需要基于实际地质和水文地质条件的综合分析。发送反馈。

### 3.2. 矿井瞬变电磁法的特点

(1) 利用小线圈测量使得布置的点距密集(通常为 2~10 m)，这种方式能够使勘探横向分辨率提高，使体积效应的影响降低；

(2) 考虑到地表环境与地下测量环境有很大的不同,在测量过程中不能使用地表测量中使用的大线圈(边长大于 50 m)装置,通常使用多匝小线圈边长为 2 m 的,它的优势在于测量使用的设备易携带,数据采集过程的工作量较少,因此工作效率高,成本低;

(3) 在实际工程中,地面瞬变电磁法勘探通常只能通过在地面上水平放置线圈来测量。井下瞬变电磁法能够在巷道底板布置线圈进行测量,使得巷道底板探测深度内存在的含水异常体垂直方向和水平方向发育规律能够被探测到;通过在巷道内布置直立的线圈,采用巷道掘进前方和线圈面平行的布置方式,可以采用巷道侧面平行于盘面的方式进行超前探测,从而探测出探测区域包括探测面顶部和底部含水低阻异常的发展规律;

(4) 因为在井下环境中测量装置和异常体之间的距离更近,测量信号的信噪比得到较大的提高,地面测量的信号强度远远小于井下同样有效面积的同装置测量信号的强度,地面测量信号大约为井下测量信号强度的 1/10-1/100。通常由于地面测量信号随时间衰减,干扰信号很容易覆盖表面测量信号,使得无法识别有用的异常信号(通常小于 15 毫秒);当井下几乎不受干扰信号影响时,干扰信号相位和有用信号近似等于零(超过 30 毫秒的时间周期);

(5) 矿井瞬变电磁法受井下的勘探作业环境的限制,往往测量线圈大小受巷道范围限制,使得能够探测的深度远远小于地面的探测深度,通常井下深度约为 130 m 左右。

#### 4. 应用案例

山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司工程技术人员在 90305 轨道顺槽运用瞬变电磁法用于物探。瞬变电磁探测场的施工布置如图 3 所示。

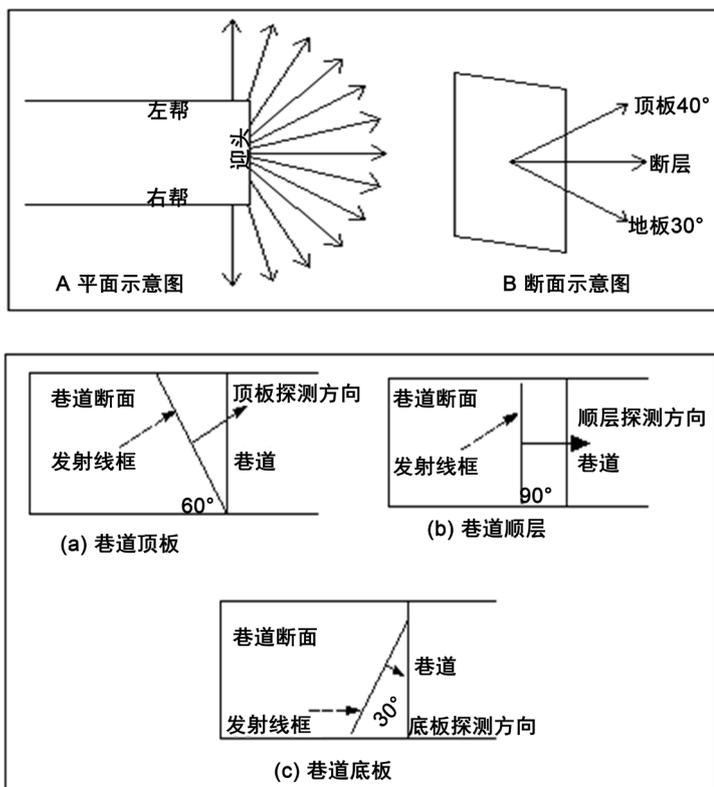


Figure 3. Schematic diagram of the construction layout of the transient electromagnetic detection site  
图 3. 瞬变电磁探测现场施工布置示意图

本次探测地点位于 90305 轨道顺槽 53 m 处，探测条件如下：

- (1) 巷道沿 9#煤层底板布置，煤层赋存稳定，巷道底板为泥岩，顶板为煤；
- (2) 巷道支护形式为锚、网(8#菱形金属网)、索联合支护。顶板未出现淋水现象，掘进断面为  $5 \times 3.2$  m。

## 5. 数据处理与结果解释

### 5.1. 数据处理

本次探测采用福州华虹智能技术开发有限公司开发的 YCS256 矿用瞬变电磁仪，瞬变电磁法观测获得的数据为各测量点和时间窗(轨迹)的瞬变感应电压，需要把资料信息转换成视深度以及视电阻率等参数来进行资料处理工作。处理过程如下：

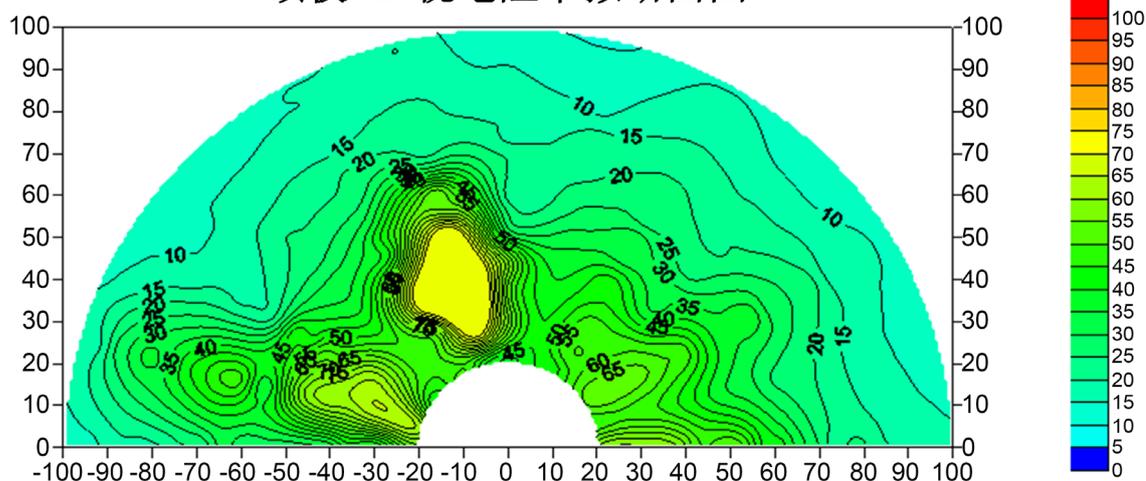
- (1) 滤波：资料处理工作开展前期需要将记录到的数据进行滤波处理，达到消除噪声的目的；
- (2) 时间 - 深度转换：由于野外观测时采集的瞬变电磁仪是二次场电随时间的变化，为了便于数据处理，采集的数据转换为电阻率随深度的变化，目前数据处理主要通过视纵向电导解释和一维分层反演解释相结合的方式进行；
- (3) 根据资料绘制出电阻率曲线；
- (4) 根据资料绘制出等视电阻率断面图。

### 5.2. 结果解释

图 4 表示的是 90305 轨道顺槽 53 m 处沿层向上倾斜  $40^\circ$  的顶板和向下倾斜  $30^\circ$  的底板的 TEM 检测视电阻率的横截面图。横截面颜色从蓝色到绿色到黄色到红色的逐渐变化代表视电阻率从低到高到高的逐渐变化。在探测范围内顶板斜向上  $40^\circ$  方向 100 m 范围内，迎头正前方，角度范围  $70^\circ \sim 90^\circ$ ，深度 30~60 m 与同一深度相比，存在一个相对高阻异常区，另一个没有明显的低阻异常区，因此判断探测区富水性相对较弱；在探测范围内，它位于顺层方向 100 m 以内的左侧。

角度范围  $20^\circ \sim 30^\circ$ ，深度 30~60 m 同一深度上有一个相对高阻异常区，因此判断检测区内相对富水较弱；在底板倾斜  $30^\circ$  方向 30 m 范围内，同一深度没有明显的低阻异常区和高阻异常区，该探测范围内的富水性较弱。

顶板 $40^\circ$ 视电阻率拟断面图



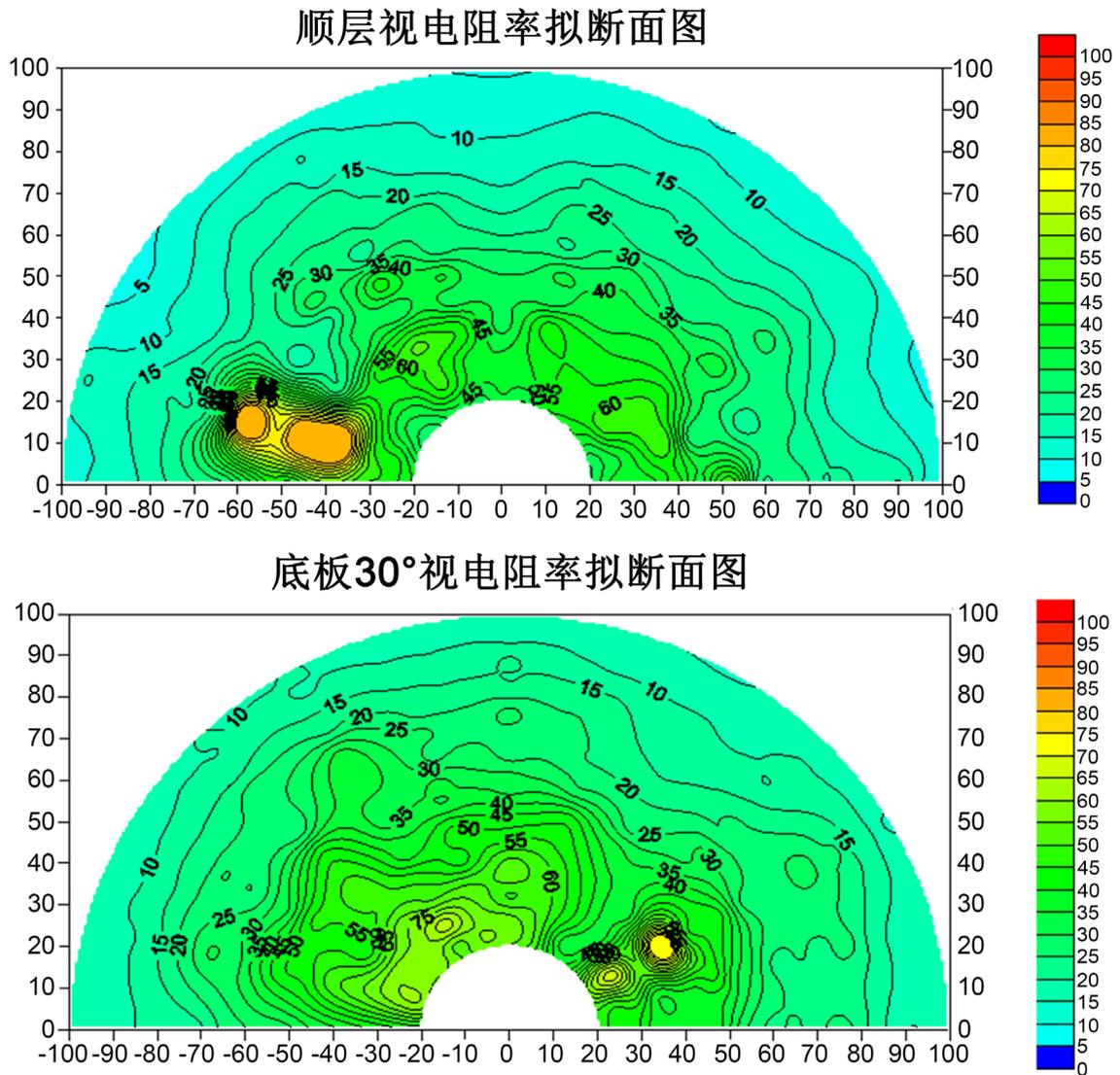


Figure 4. Cross-sectional view of iso-resistivity  
图4. 等视电阻率断面图

## 6. 结语

(1) 在探测范围内顶板斜向上 40° 方向 100 m 范围内，迎头正前方，角度范围 70°~90°，深度 30~60 m 与同深度相比，有一个相对高阻异常区，另一个没有明显的低阻异常区。推测相对丰富的水在该检测范围内较弱；

(2) 左侧在地层方向 100 米以内，角度范围 20°~30°，深度 30~60 米。与深度相比，存在一个相对高阻异常区，另一个没有明显的低阻异常区；

(3) 从 30 m 到底板倾斜向下 100 米范围内，同一深度没有明显的低阻异常区和高阻异常区。推测该探测范围内的富水性较弱。

## 参考文献

- [1] 程居山. 煤矿机械[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1997.

- 
- [2] 刘红英. 煤矿主排水系统自动化控制研究[J]. 煤矿机械, 2018(4): 27-28.
  - [3] 国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016: 179.
  - [4] 胥翔. 临涣矿区太原组灰岩富水性评价[J]. 煤炭技术, 2016(9): 93-94.
  - [5] 高荣. 蒙陕矿区深埋煤层首采工作面水文地质条件研究[J]. 煤炭技术, 2018(4): 102-103.
  - [6] 李红. 土城矿 13 采区延伸排水系统设计[J]. 水力采煤与管道运输, 2014(1): 77-79.
  - [7] 杜运夯, 孙小林, 陈小国. 《煤矿防治水细则》专家解读[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018: 101.
  - [8] 宋占松. 我国煤矿水害救援装备的技术现状及相关建议[J]. 煤矿机电, 2016(1): 109-111.
  - [9] 苏东林, 樊振丽. 大型逆断层富水性探测与防水煤柱留设研究[J]. 煤炭科学技术, 2014(12): 158-160.
  - [10] 张家乐, 冯松宝, 赵梓臣. 降低水位法在井筒施工中过强含水层的应用[J]. 煤炭工程, 2015(3): 44-46.