



## 全方位激电测井在金矿普查中的应用 ——以山东省莱州市招贤地区为例

时彦芳<sup>1,2</sup>, 朱钊锐<sup>1,2</sup>, 李 波<sup>1,2</sup>

1. 山东省地质矿产勘查开发局 801 水文地质工程地质大队(山东省地矿工程勘察院), 山东 济南 250014;

2. 山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014

**摘 要:** 与地面激发极化法相比, 井中激电测井方法测量电极更接近矿体, 因而具有更高的信噪比, 勘探精度更高, 在金属矿普查和勘探中应用广泛. 通过该方法在山东省莱州市招贤地区金矿普查中的应用实例, 研究讨论了其在金矿普查中的实际效果. 结果表明, 金矿、多金属矿富集岩段表现为低电阻率极高化率, 异常特征明显. 该方法可以判断矿体展布规律及分布状态, 指导矿化体钻探追索方向, 具有明显的地质效果.

**关键词:** 金矿普查; 隐伏矿体; 激发极化法测井; 地-井方位测井; 山东省

## APPLICATION OF OMNIDIRECTIONAL INDUCED POLARIZATION LOGGING IN PROSPECTING OF GOLD DEPOSITS: A Case Study of Zhaoxian Area in Shandong Province

SHI Yan-fang<sup>1,2</sup>, ZHU Zhao-rui<sup>1,2</sup>, LI Bo<sup>1,2</sup>

1. No. 801 Hydrogeology and Engineering Geology Brigade, Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources

(Shandong Geo-mineral Engineering Exploration Institute), Jinan 250014, China;

2. Shandong Research Center for Groundwater Environmental Protection and Restoration Engineering Technology, Jinan 250014, China

**Abstract:** Compared with the ground induced polarization (IP) method, the well IP logging is much closer to orebody, and thus it has higher signal-to-noise ratio and exploration precision, which is widely used in the survey and exploration of metal minerals. Based on the application of the method in the prospecting of gold deposits in Zhaoxian area of Laizhou City, Shandong Province, the paper discusses the practical effects of IP logging in gold deposit exploration. The results show that the rocks with enriched gold and polymetallic ores are characterized by low resistivity, high polarizability, and distinct anomaly. The method can judge the distribution rule and state of orebody, and guide the drilling direction of mineralized body, with obvious geological effects.

**Key words:** gold deposit exploration; concealed orebody; IP logging; ground-well logging; Shandong Province

### 0 引言

山东省莱州市矿产资源丰富, 尤其以金为主, 是山

东省乃至中国金矿的重要产区, 分布着百余个金矿床

(点), 形成了著名的胶西北金矿集中区. 其中已探明

收稿日期: 2020-04-02; 修回日期: 2020-06-01. 编辑: 张哲.

基金项目: 山东省地质勘查项目“山东省 1:5 万区域水文地质调查(新泰幅、新汶幅)” (鲁勘字[2018]44 号).

作者简介: 时彦芳(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事物探技术与工程工作, 通信地址 山东省济南市经十路 13632 号, E-mail/272151912@qq.com

的特大型金矿床 4 处,分别为焦家、马塘、曲家和新城金矿床,以及望儿山、河西、河东、东季、上庄等大、中型金矿床 30 处,小型金矿床、金矿点近百处,是我国重要的黄金生产基地<sup>[1-2]</sup>。

焦家金矿床位于著名的焦家断裂金矿带的南端,为我国 20 世纪 60 年代末至 70 年代初发现的金矿成矿类型,命名为“焦家式金矿床”,即破碎带蚀变岩型金矿床,是我国著名的金矿床之一。

为进一步研究金矿成矿规律,在本地区开展了金矿勘查工作<sup>[3-6]</sup>,进一步追索矿体走向,查明井旁盲矿体并确定其空间位置。在完成大功率激电中梯扫面与激电测深工作的基础上,对勘探孔 152ZK03 实施了地-井方位激电测井工作<sup>[7-13]</sup>。全方位激电测井揭示了地下岩(矿)层与测井曲线的对应关系,利用其方位曲线电性特征发现了井底盲矿体,取得了较好的地质效果<sup>[14-31]</sup>。

## 1 地质概况

### 1.1 区域地质背景

工作区位于我国著名的三山岛-仓上金矿成矿带与莱州-龙口金矿成矿带的中间地带,地质构造复杂,成矿地质条件有利。区内岩性以结晶基底和中生代侵入岩为主,基底岩系主要由新太古代花岗岩、古元古代荆山群(粉子山群)变粒岩及侵入其中的中、新元古代变辉长岩和花岗闪长岩组成。中生代燕山期侵入岩非常发育,出露面积占勘查区总面积的 2/3 以上。区内基底构造以近东西向韧性剪切带、片麻理、条带为主,脆性断裂以北东向断裂最为发育。

### 1.2 钻孔地质概况

152ZK03 钻孔位于莱州市金城镇,孔深 1853.47 m,静水位 35 m。孔位处于胶西北地区焦家金矿成矿带西北、三山岛断裂带东部(图 1)。根据钻孔岩性特征来看,孔内岩性较为简单,开孔 5 m 第四系后便进入变辉长岩、构造碎裂岩中,160 m 以下岩性过渡为二长花岗岩,1450 m 左右逐渐接近构造断裂带的边部——绢英岩化花岗质碎裂岩,1750 m 左右经主断裂面过渡为花岗片麻岩至孔底。

### 1.3 焦家断裂带特征

焦家断裂带是胶东金矿成矿区内一条规模较大的断裂构造带,在东西宽约 6 km 的范围内由 10 余条

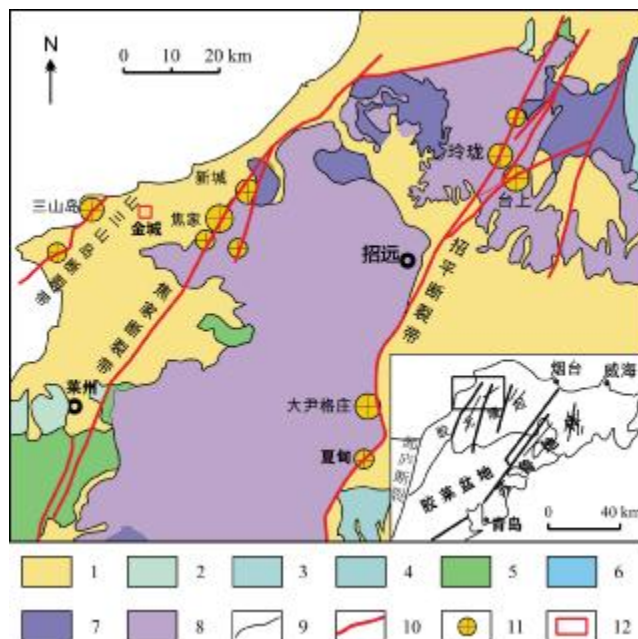


图 1 山东莱州-招远地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Laizhou-Zhaoyuan area in Shandong Province

1—第四系(Quaternary); 2—古元古界蓬莱群(Paleoproterozoic Penglai gr.); 3—古元古界粉子山群(Paleoproterozoic Fenzishan gr.); 4—古元古界荆山群(Paleoproterozoic Jingshan gr.); 5—太古宇胶东群(Archean Jiaodong gr.); 6—早白垩世艾山岩体(Early Cretaceous Aishan rock mass); 7—早白垩世郭家岭岩体(Early Cretaceous Guojialing rock mass); 8—晚侏罗世玲珑岩体(Late Jurassic Linglong rock mass); 9—地质界线(geological boundary); 10—断裂(fault); 11—金矿床(gold deposit); 12—研究区(study area)

相互平行的北东向断裂构造组成。主干断裂下盘往往沿走向及倾向发育有分支断裂,沿走向的分支表现为分支复合和分支尖灭两种。分支复合主要集中出露于红布、河西、侯家、新城、河东一带;分支尖灭主要出露于焦家矿区东北端、龙埠及邱家附近。龙埠附近分支断裂走向北东东,倾向南东,倾角近直立,延伸几十米到几百米,宽几十厘米到几米,宽度变化较大,属张扭断裂,于北东端尖灭,南西端与主干断裂汇合。寺庄、邱家附近分支断裂走向北北东—北东,延伸 200~1200 m,宽度 10~100 m,变化较大,倾向北西,倾角 30~40°,属压扭性质,于北东端尖灭,南西端与主干断裂汇合。

沿反倾向上的分支出现于主干断裂倾角由陡变缓的转折地带,走向上主干断裂由北东向北北东方向变化的转折部位,成群出现,虽接近主干断裂却不与主干断裂相交,组合形态呈雁行状,往往赋存有小矿体。

## 2 地球物理特征

为更好地解释激电测井曲线,开工前用标本架法对 152ZK03 钻孔岩心采样进行了电性参数测量,统计岩石电性参数见表 1。

由表 1 可以看出,本区岩(矿)石电性差异明显,特别是参数  $\eta_s$  差异尤为突出,黄铁绢英岩化碎裂岩呈低阻高极化特征,其极化率高出主要围岩二长花岗岩的几倍。绢英岩化花岗质碎裂岩仅次于黄铁绢英岩化碎裂岩,呈相对低阻高极化特征。其余岩性极化率值相差不大,电阻率呈高阻特征。各岩石在电性特征上的差异为激电测井提供了地球物理基础。

## 3 工作方法技术

### 3.1 仪器及性能校验

本次井中激电测量工作使用仪器为重庆地质仪器厂生产 JCH-3 绞车控制器、JD-3 软电极系探管、DJF-2 型大功率激电智能发射机一台、DJS-8A 型数字直流激电接收机一台。JCH-3 绞车控制器工作电源为单相交流 220 V 电源,10 kW 雅马哈发电机一台配套 DZ-2 整流器作为供电电源。

开工前对所使用的仪器设备进行全面系统的检查,使用 DMF-1 激电模拟器对激电接收机进行了稳定性检查,所用仪器的精度均满足要求。

### 3.2 激发极化法测井

本次激发极化法测井采用顶部梯度电极系装置,电极系装置为 N5M15A,点距 5 m,异常部位加密至 2.5 m,矿化部位加密到 1 m。为了更好地避免岩矿石极化后的剩余极化电位(尚未完全衰减的二次电位),

相对增加连续两个点之间的测量时间间隔,以保证最佳地质效果。

### 3.3 地-井(方位)方式测井

地-井方式测井采用梯度装置点测方式,即 M、N 极同时下井,深度记录点在 MN 极中点。井口方位 AO 电极位于井口(接套管),另一供电电极 B 置于无穷远。在主剖面上进行主、反方位测量并在垂直主剖面的辅助方位上做两条辅助方位的测量。根据现场试验,本次方位布置为:MN=20 m, RA=500 m, RB=5100 m。

## 4 激电异常特征及地质效果分析

### 4.1 井中激电测井异常背景值与异常下限的确定

本次激发极化法测井中,视极化率最大值为 13.10%,最小值为 3.38%,平均值为 7.07%。在激发极化法测井曲线上读取围岩井段平均视极化率作为背景值,即视极化率背景值  $\eta_B=7.07\%$ ,根据  $\eta_{a\text{ 下限}}=\eta_B+1.7N$  ( $N$  为标准偏差,计算为 1.24%), $\eta_{a\text{ 下限}}=\eta_B+1.7N=9.17\%$ 。

地-井(方位)方式测井中,在 RA=0 地-井方位曲线上选取视极化率背景值。去除已知矿化异常处的高值,计算平均值为 4.38%,作为方位测井的视极化率异常背景值,即  $\eta_B=4.38\%$ ,根据  $\eta_{a\text{ 下限}}=\eta_B+1.7N$  ( $N$  为标准偏差,计算为 1.58%), $\eta_{a\text{ 下限}}=\eta_B+1.7N=7.08\%$ 。

异常的划分原则:1)  $\eta_a$  值在其异常下限以上;2)电阻率曲线以幅值拐点根部为分层点。

### 4.2 激电异常解释与推断

图 2 为 152ZK03 孔的激电测井曲线图,极化率变化范围为 7%~14%,电阻率变化范围为 500~7000  $\Omega\text{m}$ ,

表 1 岩心物性测定成果统计表

Table 1 Physical property measurement results of cores

| 序号 | 岩石名称       | 块数 | $\rho_{\min}/\Omega\text{m}$ | $\rho_{\max}/\Omega\text{m}$ | $\rho_{\text{平均值}}/\Omega\text{m}$ | $\eta_{\min}/\%$ | $\eta_{\max}/\%$ | $\eta_{\text{平均值}}/\%$ |
|----|------------|----|------------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------------|
| 1  | 二长花岗岩      | 49 | 1163                         | 13541                        | 6281                               | 0.88             | 6.06             | 3.11                   |
| 2  | 花岗质碎裂岩     | 47 | 741                          | 8583                         | 3078                               | 1.36             | 7.47             | 3.49                   |
| 3  | 绢英岩化花岗岩    | 16 | 7392                         | 15078                        | 10733                              | 2.47             | 8.42             | 4.80                   |
| 4  | 黄铁绢英岩化碎裂岩  | 20 | 368                          | 2705                         | 1619                               | 4.19             | 68.25            | 19.7                   |
| 5  | 绢英岩化花岗质碎裂岩 | 29 | 654                          | 8224                         | 3599                               | 2.56             | 26.51            | 9.65                   |
| 6  | 闪长玢岩       | 12 | 6938                         | 15285                        | 10489                              | 1.67             | 3.21             | 2.34                   |
| 7  | 硅化绢英岩化花岗岩  | 16 | 1459                         | 25085                        | 12461                              | 1.36             | 13.55            | 5.54                   |
| 8  | 黑云斜长片麻岩    | 4  | 1238                         | 21860                        | 11439                              | 1.10             | 5.10             | 2.58                   |



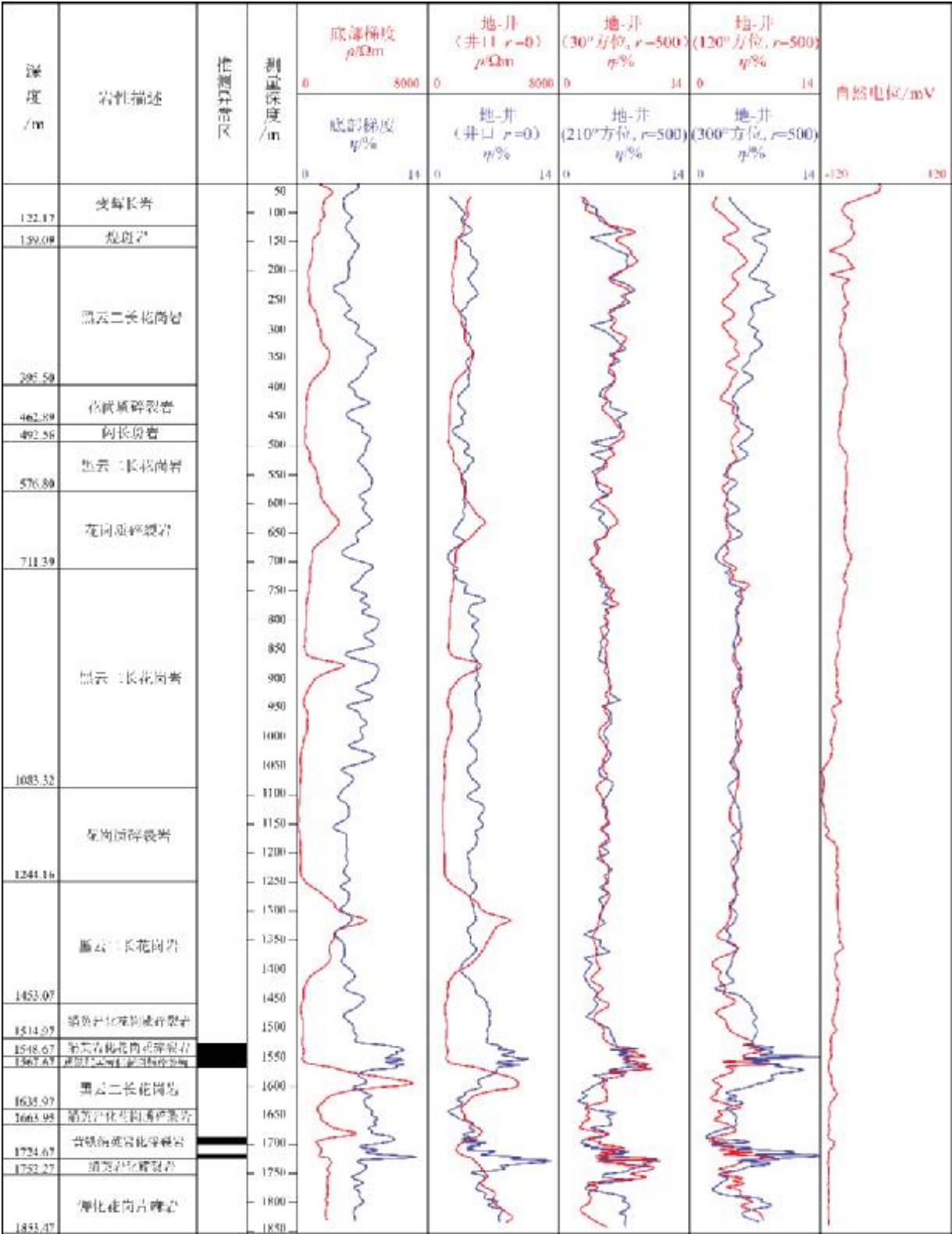


图 2 152ZK03 孔激电测井曲线图

Fig. 2 IP logging curves of borehole 152ZK03

两者反向跳跃特征明显, 在 1525~1570 m、1685~1700 m、1716~1725 m 电性特征为明显的低阻高极化, 钻孔资料揭示该部位存在不同程度的黄铁矿化和绢英岩化现象。

激电测井与地-井方式  $r=0$  曲线均出现了低阻高极化异常特征,地-井其他四方位测量曲线在相应位置也出现了异常,1525~1570 m、1685~1700 m、1716~

1725 m 附近,120°、300°两支曲线跳跃震荡,总体形态一致,但 300°(倾向一侧)异常幅度明显高于 120°(反倾向一侧),300°一侧在 1550 m 和 1721 m 分别取得极

| 层号 | 深度/m   | 层厚/m  | 厚度/%   | 注记                      | 地 质 简 述                           |
|----|--------|-------|--------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1  | 120.25 | 15.25 | 86.29  | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 变质岩类: 灰绿色, 细粒状结晶结构, 具团块状          |
| 2  | 135.50 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 泥质岩: 灰绿色, 粉砂状结构, 具层状构造            |
| 3  | 150.75 | 15.25 | 36.69  | — — —<br>— — —<br>— — — | 黑云二长花岗岩: 灰白色, 粗粒状, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 4  | 166.00 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 灰绿色: 灰绿色, 细粒状结晶结构, 具团块状构造         |
| 5  | 181.25 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 花岗岩: 灰白色, 粗粒状结晶结构, 具块状构造          |
| 6  | 196.50 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 黑云二长花岗岩: 灰白色, 粗粒状, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 7  | 211.75 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 花岗岩: 灰白色, 粗粒状结晶结构, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 8  | 227.00 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 黑云二长花岗岩: 灰白色, 粗粒状, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 9  | 242.25 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 花岗岩: 灰白色, 粗粒状结晶结构, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 10 | 257.50 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 黑云二长花岗岩: 灰白色, 粗粒状, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 11 | 272.75 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 花岗岩: 灰白色, 粗粒状结晶结构, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 12 | 288.00 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 黑云二长花岗岩: 灰白色, 粗粒状, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 13 | 303.25 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 花岗岩: 灰白色, 粗粒状结晶结构, 具块状构造, 具明显定向构造 |
| 14 | 318.50 | 15.25 | 100.00 | △ △ △<br>△ △ △<br>△ △ △ | 黑云二长花岗岩: 灰白色, 粗粒状, 具块状构造, 具明显定向构造 |

图 3 验证孔 160ZK01 钻孔柱状图

Fig. 3 Columnar section of verification borehole 160ZK01

大值 21.1%、15.6%，平均值 9.82%；120°一侧在 1553 m 和 1721 m 分别取得极大值 9.31%、10.1%，平均值 7.35%。不管是极大值还是平均值，300°一侧都比 120°一侧高，这表明该矿化体矿化程度 300°一侧优于 120°一侧，或矿化体主要沿倾向一侧延伸。

对比地-井方位测量中 30°和 210°两支曲线，30°一侧在 1560 m 和 1722 m 分别取得极大值 7.08%、7.02%，平均值 6.84%；210°一侧在 1562 m 和 1724 m 分别取得极大值 7.02%、7.03%，平均值 6.89%。不管是极大值还是平均值，30°一侧和 210°一侧极化率差异较小，无明显方向性，这表明该矿化体 30°和 210°两方位展布较均匀，矿体有向北西方向侧伏的可能。

## 5 隐伏矿体验证追索

2018 年，山东省莱州市招贤地区金矿普查工作对前期激电测井工作推测的隐伏矿体进一步验证。验证孔编号 160ZK01（钻孔柱状图见图 3），位于 152ZK03 孔北西方向，终孔深度 1852.17 m，累计揭露蚀变段约 70 m，激电测井工作的成功开展为下一步找矿工作指明了方向。

## 6 结论

1) 低阻-高极化异常与岩体的黄铁绢英岩化及硅化有关，是莱州市招贤地区金矿、多金属矿化体的主要异常特征，也是蚀变矿化的标志。本研究可为该地区类似激电测井工作的开展提供有意义的参考。

2) 电阻率、极化率和自然电位为激电测井主要测量参数，极化率参数较电阻率和自然电位对多金属异常反映更加明显，可作为指示矿体位置及方位的主要依据。

3) 激电测井和地-井方位测井方法因供电电极或测量电极更接近矿体，测量到的激发极化特征更明显，不但可以较准确地圈定井壁激电异常，还可以推测出孔旁盲矿体的位置及分布特征，为多金属勘查中之有效的地球物理勘探方法。

## 参考文献(References):

- [1] 严加永, 滕吉文, 吕庆田. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(3): 871-891.
- Yan J Y, Teng J W, Lü Q T. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23

(3): 871-891.

- [2] 刘树臣. 发展新一代矿产勘探技术——澳大利亚玻璃地球计划的启示[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 53-56.
- Liu S C. Towards the next generation of giant minerals exploration techniques: some considerations about the glass earth [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 53-56.
- [3] 宋明春, 崔书学, 杨之利, 等. 山东焦家金矿带深部找矿的重大突破及其意义[J]. 地质与勘探, 2008, 44(1): 1-8.
- Song M C, Cui S X, Yang Z L, et al. Great progress and far-reaching significance of deep exploration in the Jiaojia metallogenic belt, Shandong province [J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(1): 1-8.
- [4] 熊玉新, 于学峰, 迟乃杰, 等. 焦家金矿带 3000m 科研深钻地球物理测井及初步分析[J]. 山东国土资源, 2018, 34(5): 66-73.
- Xiong Y X, Yu X F, Chi N J, et al. Geophysical logging and primary analysis of scientific research deep drilling at the depth of 3000m in Jiaojia gold belt [J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(5): 66-73.
- [5] 王新娥, 许东晖, 孙之夫, 等. 山东黄金资源钻探井测井资料分析方法与应用[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 397-403.
- Wang X E, Xu D H, Sun Z F, et al. Wireline logs analysis and application of Shandong gold resources scientific drilling [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(3): 397-403.
- [6] 祝德成, 刘汉栋, 祝培刚, 等. 焦家断裂带南段深部地球物理地球化学特征与找矿方向[J]. 山东国土资源, 2017, 33(12): 6-12.
- Zhu D C, Liu H D, Zhu P G, et al. Geophysical and geochemical characteristics and prospecting direction in deep section of Southern Jiaojia fault belt [J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(12): 6-12.
- [7] 蔡柏林, 黄智辉, 谷守民. 井中激发极化法[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 47-163.
- Cai B L, Huang Z H, Gu S M. Well induced polarization method [M]. Beijing: Geological Press, 1983: 47-163. (in Chinese)
- [8] 李建良. 井中激发极化法在金牙金矿床普查中的应用[J]. 地质与勘探, 2016, 52(5): 924-930.
- Li J L. Application of the down-hole IP method to a general survey in the Jinya gold deposit [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(5): 924-930.
- [9] 张征. 彩霞山铅锌矿区井中激电应用[J]. 地质与勘探, 2005, 41(S1): 19-23.
- Zhang Z. An application of down-hole IP method to the mineral exploration in the Caxiashan Pb-Zn mine [J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(S1): 19-23.
- [10] 张征. 镜儿泉铜镍矿区井中激电的应用效果[J]. 地质与勘探, 2005, 41(S1): 16-18.
- Zhang Z. Effects of borehole IP survey in the Jingerquan Cu-Ni mine [J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(S1): 16-18.
- [11] 高长荣. 井中激电在西霞矿区的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31

- (S1): 98-101.
- Gao C R. The application of the borehole IP method in the Xixia ore district [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 31 (S1): 98-101.
- [12] 潘建西. 井中激电测井在金属矿勘探中的应用[J]. *西北地质*, 2010, 43(2): 190-194.
- Pan J X. Application of electrical logging in the metallic ore exploration [J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(2): 190-194.
- [13] 陈有太. 井中激电在金矿床上应用的地质效果[J]. *物探与化探*, 1990, 14(3): 202-208.
- Chen Y T. The application of borehole induced polarization to a gold deposit [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1990, 14(3): 202-208.
- [14] 何显文. 综合井中物探在某铜矿上的找矿效果[J]. *地质与勘探*, 1991, 35(5): 43-46.
- He X W. Deep-seated highly conductive and magnetic orebody exploration using hole to hole comprehensive geophysical prospecting [J]. *Geology and Prospecting*, 1991, 35(5): 43-46.
- [15] 周峰, 潘和平, 吴国平, 等. 井中激电地-井方式井旁球体正反演[J]. *物探与化探*, 2008, 32(3): 321-325.
- Zhou F, Pan H P, Wu G P, et al. Forward and inversion of sphere beside well in the method of ground-well induced polarization [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2008, 32(3): 321-325.
- [16] 鲍世才, 马彪. 地球物理测井在岩盐矿勘探中的应用[J]. *物探与化探*, 2013, 37(3): 449-452.
- Bao S C, Ma B. The application of geophysical well logging to the exploration of rock salt [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2013, 37(3): 449-452.
- [17] 米宏泽. 金属矿地下地球物理勘查技术的研究现状与发展思考[J]. *矿产勘查*, 2019, 10(3): 601-605.
- Mi H Z. Research status and development thinking of underground geophysical exploration techniques for metal deposits [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(3): 601-605.
- [18] 柳建新, 曹创华, 童孝忠, 等. 综合物探方法在青藏高原某钨多金属矿的勘查效果[J]. *地质与勘探*, 2012, 48(6): 1188-1198.
- Liu J X, Cao C H, Tong X Z, et al. Application of integrated geophysical methods to a molybdenum polymetallic deposit in the Tibetan Plateau [J]. *Geology and Exploration*, 2012, 48(6): 1188-1198.
- [19] 张东风, 柳建新, 谢维. 激电测深法在非洲刚果(金)某铜钴矿区的勘查应用[J]. *地质与勘探*, 2010, 46(4): 664-669.
- Zhang D F, Liu J X, Xie W. Exploration application of IP sounding method in Africa and Congo (DRC) of a copper-cobalt mining [J]. *Geology and Exploration*, 2010, 46(4): 664-669.
- [20] 曹令敏. 地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用及展望[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 701-708.
- Cao L M. The application and expectation of the geophysical methods to deep metal mine exploration [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26 (2): 701-708.
- [21] 韩颐. 有色金属矿产资源勘查技术方法综述[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(6): 590-593.
- Han Y. Review on geo-exploration technologies for nonferrous metal resources [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(6): 590-593.
- [22] 张参辉, 郭玉溪, 白德胜, 等. 河南嵩县槐树坪金矿矿体富集规律与电性特征的关系[J]. *现代矿业*, 2018, 34(4): 46-51.
- Zhang C H, Guo Y X, Bai D S, et al. Relationship between the enrichment regularity and electrical characteristics of Huaishuping gold deposit in song county, Henan province [J]. *Modern Mining*, 2018, 34(4): 46-51.
- [23] 朱德兵. 工程地球物理方法技术研究现状综述[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 163-170.
- Zhu D B. Summarization of engineering geophysics in major of geophysical prospecting and information technique [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(1): 163-170.
- [24] 杨文采. 非线性地球物理反演方法: 回顾与展望[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 255-261.
- Yang W C. Non-linear geophysical inversion methods: Review and perspective [J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(2): 255-261.
- [25] 徐军, 范晓敏, 曾宪军, 等. 激发极化测井的三维有限差分模拟[J]. *工程地球物理学报*, 2014, 11(4): 507-512.
- Xu J, Fan X M, Zeng X J, et al. 3D definite difference simulation of induced polarization logs [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2014, 11(4): 507-512.
- [26] 郭刚. 利用激电测井划分蚀变破碎带[J]. *河南地质*, 1996, 14 (4): 296-299.
- Guo G. Using induced polarization well logging to divide altered crush zone [J]. *Henan Geology*, 1996, 14(4): 296-299.
- [27] 张雷, 黄殿君, 陈文银, 等. 多元统计方法在井中激电异常解释中的应用效果[J]. *矿产勘查*, 2012, 3(3): 379-383.
- Zhang L, Huang D J, Chen W Y, et al. The way to reduce interpretation ambiguity of induced polarization logging [J]. *Mineral Exploration*, 2012, 3(3): 379-383.
- [28] 田玉福, 马子宁, 张治川, 等. 地球物理测井在金属矿勘探中的应用[J]. *四川地质学报*, 2011, 31(4): 485-488.
- Tian Y F, Ma Z N, Zhang Z C, et al. The application of geophysical logging to the metallic mineral resources exploration [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2011, 31(4): 485-488.
- [29] 童茂松. 泥质砂岩激发极化弛豫时间谱的正则化反演[J]. *物探与化探*, 2015, 39(1): 186-191.
- Tong M S. The regularization inversion of induced polarization relaxation time spectrum of argillaceous sand [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2015, 39(1): 186-191.

表 1 自然回灌与压力回灌下回扬周期  
Table 1 Pump lifting cycle under natural and pressure recharge

| 自然回灌                  |      | 压力回灌(0.2 MPa)         |      |
|-----------------------|------|-----------------------|------|
| Q/(m <sup>3</sup> /h) | t/d  | Q/(m <sup>3</sup> /h) | t/d  |
| 40                    | 20.4 | 40                    | 25.8 |
| 60                    | 13.3 | 60                    | 18.7 |
| 80                    | 8.3  | 80                    | 13.7 |

#### 4 结论

1) 地热水回灌过程中由于热储层的物理堵塞、生物化学堵塞、悬浮物阻塞等, 渗透系数是衰减的, 且服从衰减方程  $K=K_0e^{-\lambda t}$ , 渗透系数衰减是砂岩型热储层回灌能力下降的主要原因。

2) 渗透系数衰减方程是计算回灌井井筒中灌压-时间关系曲线、回扬周期等相关数据的基础。

3) 利用 Origin 软件求取渗透系数衰减方程具有方便快捷、规范性好等优点, 可在回灌试验数据处理中推广使用。

#### 参考文献(References):

- [1] 何满潮, 刘斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(4): 374-377.  
He M C, Liu B, Yao L H, et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002, 32(4): 374-377.

- [2] 林黎, 王连成, 赵苏民, 等. 天津地区孔隙型热储层地热流体回灌影响因素探讨[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 125-128.

Lin L, Wang L C, Zhao S M, et al. A discussion of the factors affecting geothermal reinjection in the geothermal reservoir of porous type in Tianjin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(6): 125-128.

- [3] 林建旺, 刘小满, 高宝珠, 等. 天津地热回灌试验分析及存在问题[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(3): 200-204.

Lin J W, Liu X M, Gao B Z, et al. Analyses and discussion on geothermal reinjection test in Tianjin [J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2006, 25(3): 200-204.

- [4] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 76-77.

Xue Y Q. Principles of groundwater dynamics [M]. Beijing: Geology Press, 1986: 76-77. (in Chinese)

- [5] 白宏洁, 方永伦, 郭健. 开封市超深层地下水回灌研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(9): 48-49.

Bai H J, Fang Y L, Guo J. Study on reinjection test of ultra deep groundwater in Kaifeng [J]. Yellow River, 2010, 32(9): 48-49. (in Chinese)

- [6] 朱红丽, 刘小满, 杨芳, 等. 开封市深层地热水回灌试验分析与研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(2): 215-219.

Zhu H L, Liu X M, Yang F, et al. Analysis and study on geothermal reinjection test of deep groundwater in Kaifeng [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2011, 30(2): 215-219.

- [7] 赵建康, 张勇, 崔进. 压力回灌技术在水源热泵系统中的应用研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(3): 55-58.

Zhao J K, Zhang Y, Cui J. Application research on pressure recharge in underground-water source heat pump system [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(3): 55-58.

(上接第 91 页/Continued from Page 91)

- [30] 傅良魁, 李金铭, 陈兆洪. 埋藏极化体激电时间谱视参数的实验研究结果[J]. 地质与勘探, 1985, 21(12): 38-43.

Fu L K, Li J M, Chen Z H. Experimental results of apparent parameters of IP time spectrum of buried polarized bodies [J]. Geology and Prospecting, 1985, 21(12): 38-43. (in Chinese)

- [31] 张世龙, 康伟浩, 任二峰, 等. 井中三分量磁测在青海祁连小水沟地区铁多金属矿的应用[J]. 地质与资源, 2019, 28(4): 401-404.

Zhang S L, Kang W H, Ren E F, et al. Three-component magnetic survey in the borehole of Xiaoshuigou iron polymetallic deposit, Qinghai province [J]. Geology and Resources, 2019, 28(4): 401-404.