

doi: 10.11720/wtyht.2020.0217

蒋永芳,李芳书,曹渊,等.广域电磁法在金属矿勘探中的应用研究和探讨[J].物探与化探,2020,44(5):1073-1077.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0217>

Jiang Y F, Li F S, Cao Y, et al. Discussion and research on the application of the wide field electromagnetic method to the exploration of metal ore deposits [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1073-1077. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.0217>

广域电磁法在金属矿勘探中的应用研究和探讨

蒋永芳^{1,2}, 李芳书^{1,2}, 曹渊³, 夏灵云^{1,2}, 张婷^{1,2}

(1.湖南继善高科技公司,湖南长沙 410208;2.湖南省深地资源电磁法勘探工程技术研究中心,湖南长沙 410208;3.河南省地质矿产勘查开发局第二地质勘查院,河南郑州 451464)

摘要:在金属矿产资源勘查工作中,随着探测深度的不断增大,矿区人文干扰因素严重,物探勘查难度加大,费用增加,因此在深部找矿及危机矿山资源大调查工作中,须大力发展新方法、新技术、新仪器设备。本文介绍广域电磁法的基本原理、工作方法、应用原则和条件等,并以河南某金矿做具体案例,进行分析和研究,阐述广域电磁法在金属矿深部勘查中的有效性。

关键词:广域电磁法;广域视电阻率;构造破碎带;电性异常

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)05-1073-05

0 引言

地球物理勘探是以岩石、矿石(或地层)与其围岩的物理性质差异为基础,用专用的仪器设备,观测和研究天然存在或人工形成的物理场的变化规律,进而达到查明地层、地质构造,寻找矿产资源和解决工程地质、水文地质等问题的目的。随着浅部资源的开采,寻找复杂的、深部的矿体难度越来越大,成本也越来越高。广域电磁法^[1]具有探测深度大、探测速度快、成本低、分辨率高、抗干扰能力强、精度高等优点^[2],适合用于寻找深部金属矿床,尤其对大型构造控矿型矿床^[3]有着很好的指示作用。豫西熊耳山地区位于华北陆块南缘,在该矿区开展了广域电磁法的实验工作,提交了可供工程验证的找矿靶位,确定研究区内高效勘查技术方法组合。

1 研究概况

广域电磁法是由中南大学何继善院士研发的一种人工源频率域电磁测深新方法^[4],是利用电性特

征分析预测地层发育、构造形态、断裂展布及含油气情况等电法类勘探技术。

广域电磁法的核心就是:①定义了“广域视电阻率”;②只需测量电磁场的一个分量;③可以在广大的、不局限于远区的区域进行观测。从1996年开始,何继善院士潜心电磁波理论的研究,在以上研究的基础上于2005年正式提出严格解电磁波方程的“广域电磁法(wide field electromagnetic method, WFEM)”,保留了公式中的高次项,采用了适宜于全域的不进行简化的公式迭代计算视电阻率的方式和成果反演,从而大大拓展了人工源电磁法^[5]的观测范围,提高了观测速率、精度和分辨率。广域电磁法拓展了勘探深度,提高了勘探精度,并研发了具有完全自主知识产权的仪器装备。

2 应用原则和条件

广域电磁法工作的前提是岩矿石及围岩的电性差异,主要体现在岩石的电阻率和极化率。广域电磁法测量的基础是电阻率,目标体必须在电阻率特征上与围岩有所差异,往往是通过寻找成矿构造带、

收稿日期:2020-04-27;修回日期:2020-07-15

基金项目:河南省自然资源科研项目(2019-373-2)

作者简介:蒋永芳(1986-),男,2010年毕业于河南理工大学,主要从事矿产勘查、广域电磁法在矿产勘查中应用研究工作。Email:jiangyongfang@163.com

破碎蚀变带、不同岩性单元的接触蚀变成矿带以及伴生矿物的高异常特征等来查找成矿的载体或靶区,通过间接找矿来达到目的^[6-7]。

以金矿为例。金的工业品位 2 g/t,并且金矿体的厚度往往比较小,矿体引起的电阻率异常就特别小,但是金矿一般为构造控矿型金矿床,矿物含量往往与碎裂岩化、矿物蚀变、黄铁矿化等关系密切,而碎裂岩化、蚀变、硫化物等都表现为低阻特征,且厚度通常远大于矿体厚度,根据这一特性可以达到间接寻找金矿体的目的。再如铅锌矿,铅锌金属本身具有强导电性,但是在铅锌矿体环境中铅锌都具有强烈的亲硫性,形成一层硫化物膜,电性异常并不明显,但是其成矿载体层或构造蚀变层多伴生大量蚀变矿物,通常是通过伴生矿物引起的电性异常来寻找该矿产。

3 工程布置及数据采集的要求和方法

广域电磁仪器能够测量包括 12 个频组 80 个频率(其中 7 频组和 3 频组,6 频组和 2 频组,5 频组和 1 频组,4 频组和 0 频组各重叠了一个频率),频率范围 8 192~5/512 Hz。金属矿探测野外数据采集一般采用 11、9、7、5、3、1 频组共 40 个频点。

数据采集前后,必须做仪器对比及相关试验:

1)检查所有仪器性能是否良好,标定、一致性误差是否达到设计和规范要求,仪器在使用过程中性能稳定一致性是否较好,所采集得到的资料质量是否可靠。

2)根据工区物理点点距及电磁干扰等实际情况,做具体试采试验,看数据质量是否真实可靠,是否符合规范要求。

3)收发距的确定应满足信号采集要求和测量深度要求,同时考虑工区地形、交通、地物等因素。

4 广域电磁法数据处理与资料解释

现就河南某金矿床广域电磁法测量应用具体案例做介绍分析。

4.1 地质概况

该矿区地处华北陆块南缘、华熊台隆熊耳山隆断区,基底发育太古界太华群中—深变质岩系(2 351~3 000 Ma^[8]),主要为片麻岩;盖层为中元古界熊耳群火山喷出岩系(1 800~1 750 Ma^[9]),主要为安山岩类以及沟谷及低凹地带发育的第四系残坡积物和冲积物。赋矿围岩主要为熊耳群许山组安山岩以及太华群的片麻岩。

区内断裂构造发育,不同时期、不同产状、不同规模的断裂构造均有产出,其中 NE、NNE 向断裂是研究区内主要含矿构造。区内矿体严格受断裂构造控制,主要赋存于含矿构造蚀变带内,局部产于其顶、底板蚀变围岩中^[10]。

区内岩浆活动频繁,分布广泛,主要为太古宙、元古宙及中生代燕山期酸性花山花岗岩、正长斑岩、花岗斑岩^[11]等侵入活动。

4.2 物性分析

收集该区电性资料,其参数测定采用露头小四极法和泥团法相结合。统计结果见表 1。由统计表可知,金矿化岩石多表现为相对低阻,呈低阻高极化特征,而围岩的极化率较低电阻率较高,呈高阻低极化特征。目标体与围岩的电性有较为显著的差异,具备广域电磁法测量前提,为本次开展广域电磁法工作和解释奠定了基础。

表 1 岩(矿)石电性参数统计

Table 1 Statistical table of electrical parameters of rock (ore)

岩矿石名称	标本数	极化率/%		电阻率/($\Omega \cdot m$)	
		范围	平均值	范围	平均值
安山岩	42	0.135~2.388	1.047	1580.7~12213	5214.5
花岗斑岩	41	1.08~2.116	1.577	563.6~54139.5	5297.7
闪长岩	16	0.64~2.678	1.415	1137.4~8786.9	3942.5
片麻岩	39	0.707~3.081	1.143	250.8~10872.3	2847.8
矿化岩石	31	0.633~5.179	2.707	256.9~5559	1865.6

研究区岩矿石电阻率可分为高、中、低阻三类,即安山岩、花岗斑岩和闪长岩为中高阻电性特征,片麻岩为中低阻电性特征,矿化岩石为低阻电性特征。而金矿化岩石均发育在构造带、蚀变带中,并伴生硫化物矿物,其低阻电性特征其实为构造破碎带(构

造角砾岩、破碎蚀变岩、金矿石等)的电性特征显示,据物性研究成果和以往工作经验,构造破碎带为一条明显低于围岩的低电阻电性特征带。但因其岩性的结构、构造、矿物成分有差异等,造成电性不均匀,电阻率变化范围可能较大,一般小于 2 000 $\Omega \cdot$

m。而当破碎带中的岩石硅化程度较高时,视电阻率曲线则会表现为低阻带中的局部高阻。

4.3 数据处理

数据处理流程(图1)主要包括:①数据预处理,其主要为去噪处理、静态校正、数据滤波等;②定性分析,其主要为曲线类型分析与频率—视电阻率拟断面(图2);③定量分析^[12]。

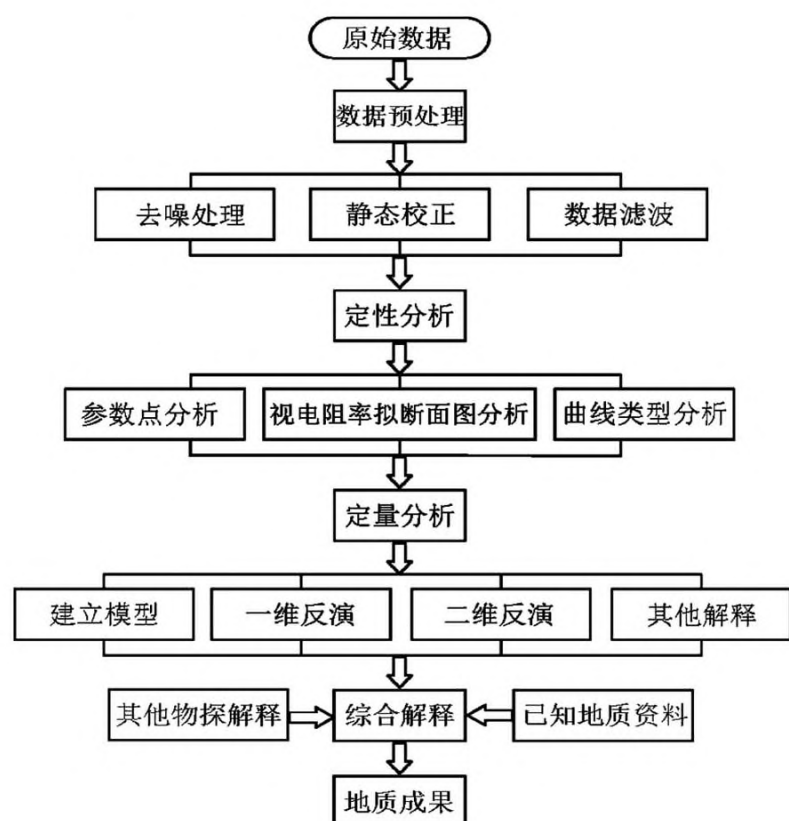


图1 广域电磁法数据处理流程

Fig.1 Data processing flow of WFEM

4.4 综合解释

本次共布设2条广域电磁法剖面,两条测线平行,相距约900 m,其中以1条GY01线做论述分析。该测线方位角137°,点距40 m,测线总长度6 km,反演深度4 000 m。该条测线现已知经过已施工钻孔7个,其中最大孔深约1 500 m,控制标高约-240 m,最深控矿位置标高约-150 m,7个钻孔均见有厚度不等、连续性较差的多个金矿体。其控制的F1-I、F1-II、F1-III三条次级构造破碎带,形态、产状与该剖面中低阻圈定异常带位置基本吻合。

依据二维介质反演剖面 and 岩石物性分析资料,并结合矿区地质资料及已知其他地质资料,研究区内的断裂构造极为发育,本测线共推断出6条构造破碎带,1条构造蚀变带,构造破碎带的命名分别与矿区地质资料断裂命名相对应,吻合度较高。太华群石板沟岩组与上覆中元古界熊耳群许山组呈角度不整合接触,在接触面上为构造碎裂岩或蚀变岩,形成一个相对围岩的低阻异常带,如图3。

经过综合资料的研究,当岩石经破碎蚀变后,其电阻率比原岩明显降低,反映在视电阻率曲线上会表现为明显的低阻特征,所以断裂、构造破碎带即显示为低阻特征。而当破碎带中的岩石硅化程度较高时,视电阻率曲线则会表现为低阻带中的局部高阻。

构造控矿型金矿床,矿物含量往往与碎裂岩化、矿物蚀变、黄铁矿化等的含量关系密切,而碎裂岩化、蚀变、硫化物等都是电阻率低阻的显示,根据这一特性可以达到间接寻找金矿体的目的。

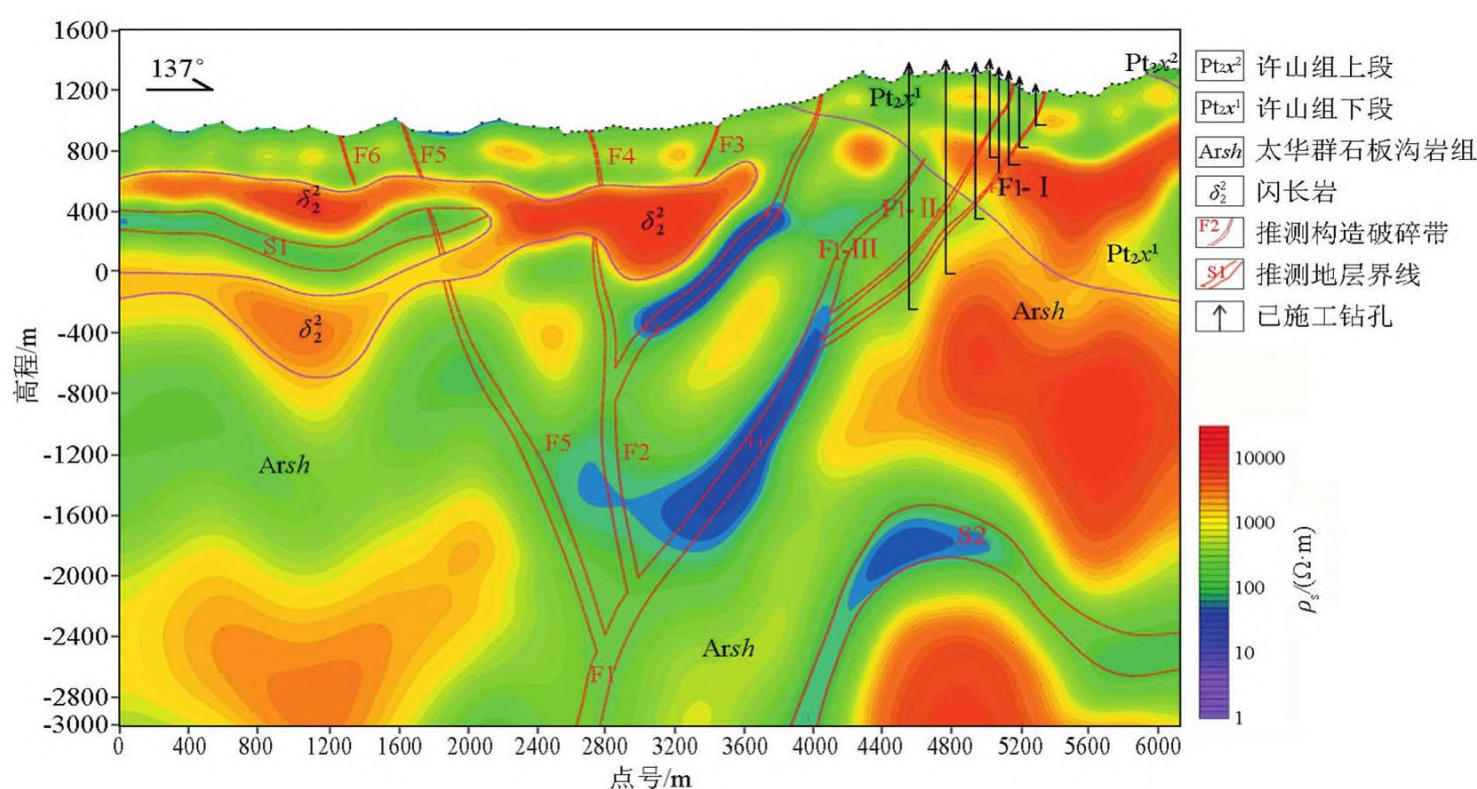


图2 GY01线广域电磁法二维反演电阻率断面及综合解释成果

Fig.2 Two-dimensional inversion resistivity section and comprehensive interpretation results of WFEM in GY01 line

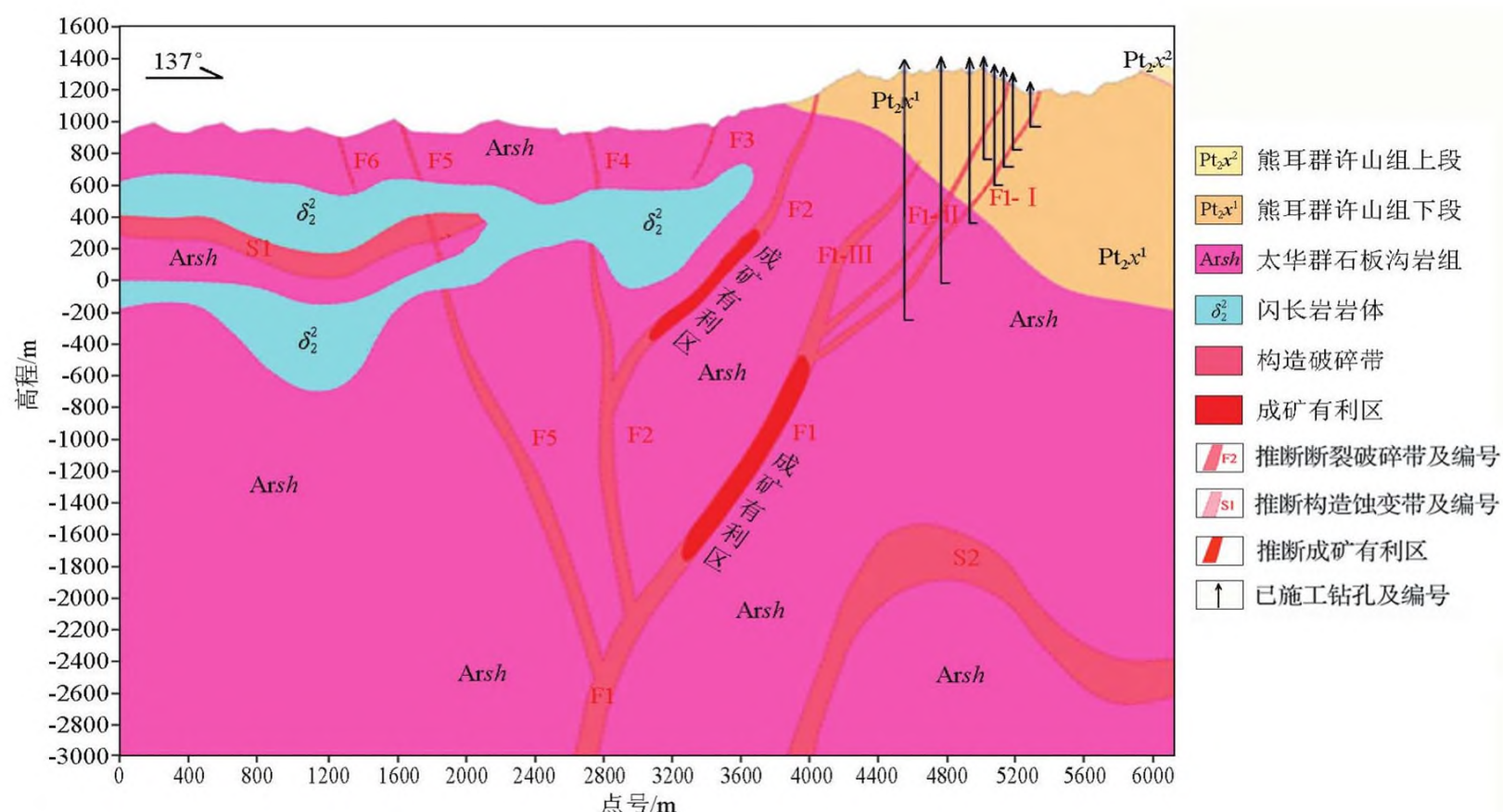


图 3 GY01 线解释成果剖面

Fig.3 Interpretation results section of GY01 line

本次研究工作,对广域电磁数据进行了系统的处理与定量反演计算,证明勘探深度 4 000 m 以内数据有效,对比已知地质资料,地层分界线清晰,位置吻合,构造破碎带异常直观,位置吻合,表明此矿区广域电磁法应用吻合度较高,效果较好。结合区内地质、其他物探等资料,取得了以下成果:

1)根据反演剖面上的 3 个主要电性层,推断区内相应的 3 个地质体,即中低阻异常为新太古界太华群石板沟岩组片麻岩类(Arsh),中高阻异常为中元古界熊耳群许山组安山岩类(Pt_2x),高阻异常为元古宙闪长岩侵入岩体。

2)依据广域电磁法视电阻率拟断面图、反演断面成果图及相关地质资料,在区内共推断划分了 6 条断裂构造带,1 条构造蚀变带。其中 F1、F5 两条构造破碎带延伸长度大,具有较好的深部找矿空间和潜力,在其深部圈定了 2 处成矿有利区。

5 结论与讨论

1)根据河南某金矿广域电磁法应用研究,表明该矿区广域电磁法的应用较好,跟已知地质资料和地质认识吻合较好,探测深度大,说明广域电磁法在金矿及金属矿的深部勘探具有较好的应用前景,在目标体与围岩有电性物性差异的前提下,能有效地圈定靶区,达到间接找矿目的。

2)一般金属矿地质情况较复杂,次级构造发

育,目标层厚度小,这些因素都会对物探的解释结果和精度造成不利的影响。然而广域电磁法河南某金矿应用效果较好,对构造破碎带异常体现明显,说明广域电磁法能应用在复杂地质情况的金属矿上。

3)广域电磁法测量的基础结果为视电阻率,电性异常单一,而金属矿大都会伴生黄铁矿,极化率较大,可以增加极化率测量,综合极化率异常结果,更有效地圈定靶区,提高找矿效果和精度。

4)广域电磁法有适应范围和条件,有些矿区,中浅部存在厚大的低电阻炭质层,或者矿体、目标体与围岩电性差异很小等,前者可能电流衰减快,不利于深部(2000 m 以下)探测,后者电性差异不明显,不利于异常的划分。

参考文献(References):

- [1] 何继善.广域电磁法和伪随机信号电法[M].北京:高等教育出版社,2010:1-7.
He J S.Wide field electromagnetic sounding methods and pseudo-random signal coding electrical method[M].Beijing:Higher Education Press,2010:1-7.
- [2] 何继善.广域电磁测深法研究[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(3):1065-1072.
He J S.Wide field electromagnetic sounding methods[J].Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065-1072.
- [3] 付思峰.上官构造蚀变岩型金矿床地质特征及化探找金经验[J].物探与化探,2008,32(3):267-269.
Fu S F.Geological characteristics and geochemical gold prospecting

- achievements in the Shanggong tectonic altered rock type gold deposit[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2008, 32(3): 267-269.
- [4] 何继善.可控源音频大地电磁法[M].长沙:中南工业大学出版社,1990.
He J S. Control source audio magnetotellurics[M]. Changsha: Central South University Press, 1990.
- [5] 汤井田,何继善.可控源音频大地电磁法及其应用[M].长沙:中南大学出版社,2005.
Tang J T, He J S. The apply of control source audio magnetotellurics[M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [6] 刘春明,董铁钢,何继善.多种电磁法在某金矿的野外勘探应用[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(9): 2422-2429.
Liu C M, Dong T G, He J S. Application of various electromagnetic methods in field exploration of a gold mine[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2422-2429.
- [7] 邓锋华,杨洋,李帝铨.广域电磁法在隐伏金矿中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2013, 10(3): 357-362.
Deng F H, Yang Y, Li D Q. Application of wide area electromagnetic method in concealed gold mine[J]. *Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(3): 357-362.
- [8] 姚军明,赵太平,李晶,等.河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re-Os 年龄和锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 374-384.
Yao J M, Zhao T P, Li J, et al. Molybdenite Re-Os age and zircon U-Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 374-384.
- [9] 黎世美,瞿伦全,李先民,等.熊耳山地区蚀变构造岩型金矿成矿地质条件及富集规律研究报告[R].洛阳:河南省地矿厅第一地质调查队,1989.
Li S M, Qu L Q, Li X M, et al. Researches on metallogenic geology and mineralization of the Xiong'ershan Structure-Controlled Alteration-Type Gold Deposit[R]. Luoyang: The First Geological Survey Team of The Department of Geology and Mineral Resources of Henan Province, 1989.
- [10] 汪江河,孙卫志,刘耀文,等.金矿体趋势预测方法及其在河南上宫金成矿带的应用效果[J]. *矿产勘查*, 2015, 6(6): 752-758.
Wang J H, Sun W Z, Liu Y W, et al. Forecasting method for gold orebody trending and its application on prospecting in Shanggong gold metallogenic belt, Henan[J]. *Mineral Exploration*, 2015, 6(6): 752-758.
- [11] 李永峰.豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钼(金)成矿作用[D].北京:中国地质大学(北京),2005:1-125.
Li Y F. The temporal and spatial relationships of Mesozoic era granitoids and molybdenum (gold) deposit mineralization in the Xiong'ershan area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2005: 1-125.
- [12] 李帝铨,谢维,程党性. $E-E_x$ 广域电磁法三维数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(9): 2459-2470.
Li D Q, Xie W, Chen D X. Three-dimensional modeling for $E-E_x$ wide field electromagnetic methods[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(9): 2459-2470.

Discussion and research on the application of the wide field electromagnetic method to the exploration of metal ore deposits

JIANG Yong-Fang^{1,2}, LI Fang-Shu^{1,2}, CAO Yuan³, XIA Ling-Yun^{1,2}, ZHANG Ting^{1,2}

(1. Hunan Geosun Hi-technology Co., Ltd., Changsha 410208, China; 2. Hunan Deep Earth Resources Electromagnetic Exploration Engineering Technology Research Center Changsha 410208, China; 3. The Second Geological Exploration Institute of Henan Geological Mineral Resources Exploration and Development Bureau, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: In the exploration of metal mineral resources, physical exploration is usually difficult but of low cost. Along with the increasing depth of the exploration and serious influence of human disturbance factors in the mining area, the difficulties and cost of physical exploration have been increasing. What's more, due to the limitations of the technical conditions such as the precision and power of the instruments and equipment, the geological effectiveness is getting worse and worse by adopting the general geophysical prospecting method. However, the wide field electromagnetic method has such advantages as great detective depth, high speed, low cost, high resolution and precision, and strong anti-interference capability, and hence can be effectively applied to metal mineral exploration, and this has been proved many times. Therefore, it is advisable to develop new methods, new technologies and new instruments represented by the wide field electromagnetic method in the investigation of deep orebodies as well as crisis mine resources. This paper introduces the basic principles, working methods, application principles and conditions of wide field electromagnetic method, analyzes and studies the case of a gold mine in Henan Province, and expounds the effectiveness of the wide field electromagnetic method in deep exploration of metal deposits.

Key words: wide field electromagnetic method; wide field apparent resistivity; structural fracture zone; electrical anomaly

(本文编辑:叶佩)