

广域电磁法在湖南柏坊铜矿区的应用研究

Research on the Application of Wide Area Electromagnetic Method in Baifang Copper Mine Area,
Hunan Province

左昌虎^{1,2}, 刘 腾¹, 廖仲轲¹, 杨 超¹

(1. 湖南水口山有色金属有限责任公司, 湖南 衡阳 421200; 2. 湖南省复杂多金属矿高效利用工程技术研究中心, 湖南 衡阳 421513)

摘要:柏坊铜矿地处衡阳盆地南缘多构造叠合复合部位,区内褶皱、断裂、不整合面、岩溶等对矿体的形成与空间分布起重要的控制作用,深部勘查难度较大。物性测试表明,区内不同地层岩(矿)石电性差异明显,运用广域电磁法可以有效的分析预测地层岩性发育、构造形态、断层展布、岩体空间分布等地质特征。通过实施7条广域电磁测深剖面,进行系统处理和定量反演计算,推断柏坊铜矿深部地层、构造、岩体等地质体界线,结合矿体的空间定位机制与规律,建立成矿地质体-地球物理找矿标志,预测有利成矿靶区。后期经钻探工程验证,广域电磁法成果与工程揭露地层及构造发育情况较为吻合,为开展边深部勘查提供了较为充分的地球物理依据。

关键词:广域电磁法; 找矿标志; 成矿靶区

中图分类号: TD166

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2023)06-0057-09

Abstract: The Baifang Copper Mine is located in the southern edge of the Hengyang Basin, where multiple structures are superimposed and composite. Folds, faults, unconformities, karst, and other factors in the area play an important controlling role in the formation and spatial distribution of the ore body. Deep exploration is difficult. Physical property tests have shown that there are significant differences in the electrical properties of rocks (minerals) from different strata in the area. The use of wide area electromagnetic methods can effectively analyze and predict geological characteristics such as rock development, structural morphology, fault distribution, and spatial distribution of rock masses. By implementing 7 wide area electromagnetic sounding profiles, conducting systematic processing and quantitative inversion calculations, the geological boundaries of the deep strata, structures, rock masses, and other geological bodies of the Baifang Copper Mine are inferred. Combined with the spatial positioning mechanism and laws of the ore body, the ore-forming geological body geophysical prospecting indicators are established to predict favorable ore-forming target areas. After verification by drilling engineering in the later stage, the results of the wide area electromagnetic method are in good agreement with the geological and structural development revealed by the engineering, providing sufficient geophysical basis for conducting edge and deep exploration.

Key words: wide area electromagnetic method; exploration markers; metallogenic target area; Baifang copper mine

1 前言

湖南柏坊铜矿地处衡阳盆地南缘,矿体小而富,矿化类型多样,矿体形态各异,成因复杂^[1]。众多学者围绕柏坊铜矿矿床地质特征^[2]、控矿条件^[3-5]、成矿规律^[4]及找矿方向^[5-7]等方面进行了大量研究,形成了多构造叠加控矿理论,矿体的形成与分布与褶皱、断裂、不整合面、岩溶等密切相关。经过多年的开采,资源逐渐枯竭,自20世纪80年代始,在生产区范围内开展了大量勘查和研究工作,找矿难度越来越大,因而向

地质工作较少的生产区外围和深部找矿,是维持矿山持续发展的必由之路。为了避免盲目找矿,降低找矿的风险,开展柏坊铜矿边深部勘查不仅需要成矿理论指导,还要地球物理勘探方法的支持^[8],特别是在生产中的矿山开展地球物理勘探,需要具有较强的抗干扰能力,并能有效分辨矿体(化)异常。

2005年何继善院士提出了广域电磁法理论,该方法采用大功率发射、宽频带频谱信号发射-接收等技术,提高了频率数据密度和信噪比,具有勘查深度大、成本低、精度高、抗干扰能力强、环保等优点^[9-10],满足了对小尺度、大埋深、复杂地质条件等深部精细探测要求。目前已广泛应用于油气、地热、采空区、深埋隧道和金属矿产勘查等多个领域^[11-18],尤其在寻找深部隐伏矿体及大型构造控矿

[作者简介] 左昌虎(1982—),男,博士,高级工程师,从事矿床学研究。

[引用格式] 左昌虎,刘腾,廖仲轲,等. 广域电磁法在湖南柏坊铜矿区的应用研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(6):57-65.

型矿床中有较好的指示作用^[19]。

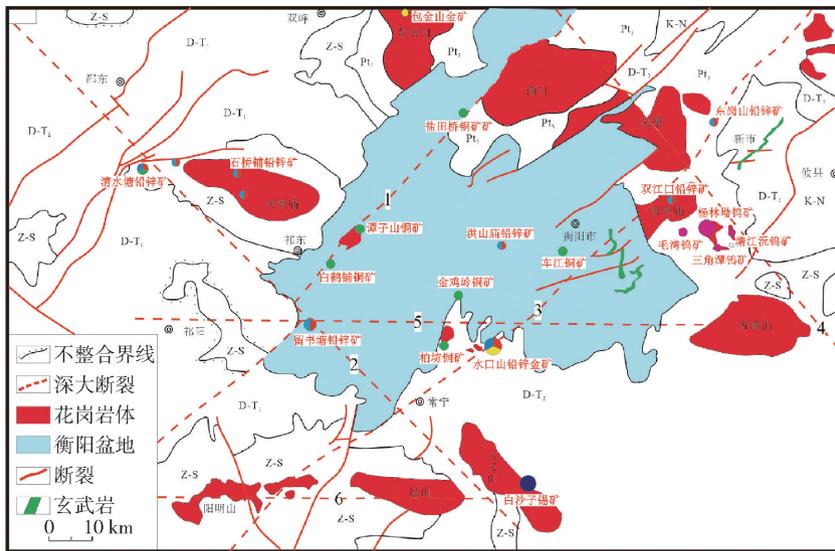
本次在柏坊铜矿开展广域电磁法测量,在前人研究的基础上,结合验证性现场地质调查及多元信息综合研究,通过系统阐述广域电磁法数据的定性分析、反演解释及电性特征,探究柏坊铜矿的地质-成矿空间架构,综合分析矿化空间定位机制与规律,建立地质-地球物理找矿标志,为柏坊铜矿边深部勘查提供地质地球物理信息支撑^[20]。

2 地质概况及物性特征

2.1 地质概况

柏坊铜矿床地处衡阳中生代陆相红层盆地南

缘,塔山东西向构造北侧,末临南北向构造北端,属多个构造叠合部位,地质图如图1所示。区域地层出露较全,除下泥盆统、中三叠统、新近系缺失外,自元古界冷家溪群至第四系均有出露。区域构造受平江-衡阳华夏系拗陷带影响,形成了一系列南北向、北西西向褶皱和北西西向、北北东向断裂构造。区域内岩浆活动强烈,主要侵位于印支晚期和燕山早期,多形成中酸性花岗岩体,主要有塔山岩体、大义山花岗岩体、水口山花岗闪长岩体等。区域内成矿条件良好,形成了一系列金属和非金属矿产,主要矿种为钨、锡、铅、锌、铜、银、金、硼、重晶石、煤、高岭土矿等。



1—株洲-双牌深大断裂带;2—邵阳-郴州基底断裂带;3—醴陵-宁远深大断裂带;4—常德-安仁基底断裂带;5—羊角塘-五峰仙基底断裂带;6—阳明山-大义山基底断裂带

图1 华南构造简图及衡阳盆地地质图

柏坊铜矿矿区内广泛出露晚古生代石炭纪、二叠纪及中生代白垩纪的地层,其他地层缺失。其中,石炭系主要是一套浅海-滨海相碳酸盐建造;二叠系为一套海陆交互相砂页岩建造;白垩系红层以角度不整合覆盖于石炭系及二叠系之上,是区内砂岩型铜矿的主要赋矿层位。区内构造主要为褶皱、断层、不整合面和岩溶构造,其中褶皱主要有柏坊向斜、憩山岭背斜、铜鼓塘倒转向斜及五背冲背斜等,区内矿体多赋存于褶皱倒转翼和倾伏端;断裂构造主要由北东-北北东向(F_{11} 、 F_{24} 、 F_{33} 等)和近东西向(F_{20} 、 F_{22} 、 F_{40} 等)两组断裂构造组成, F_{22} 为区内重要控矿构造;不整合面主要为白垩系和下伏石炭统间的接触面,既是区内容矿构造又是导矿构造;矿区内不同构造体系叠加复合,呈多期次活动的特点,控制着区内矿体的形态、分布及赋存。区内岩溶主要发

育于石炭系灰岩和白云质灰岩中,区内淋滤再造型矿体多沿岩溶边缘分布。区内岩浆岩不发育,仅在矿区南部出露有呈串珠状展布的小岩体,岩性为花岗闪长斑岩,属富钾岩体,以高硅高铝贫钙为特征,铜、铅的背景值较高,银元素较富集。

2.2 物性特征

物性特征是定性解释和定量反演的首要约束条件,将地层岩性与物性资料相结合,可探究不同电性及岩性组构地层、分辨地质构造及矿化地质体和分辨侵入岩体界面,为建立地质-地球物理模型提供依据。本次研究系统采集了柏坊矿区不同类型的岩(矿)石标本220件,采用KT-10磁铁磁化率仪测定磁化率、采用SQ-3C双频激电仪测量电阻率和极化率,具体参数见表1,柏坊铜矿不同类型岩(矿)石的物性差异主要表现在以下几个方面。

(1)白垩系泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和斗岭组碳质砂页岩总体表现为低阻低极化和低-中等磁极化特征;壶天群灰岩具高阻低极化低磁极化特征;闪长花岗斑岩具中高阻低极化低磁化率特征。

(2)含铜矿石总体表现为低阻高极化高磁极化特征,与地层相比较,明显电阻率更低、极化率和磁极化率均更高。

(3)区内岩(矿)石的电性差异较明显,根据电

性体的分布特征可以推测白垩系与壶天群不整合接触界面;当含矿地质体品位较高、厚度达一定规模时,也可以较好的通过电性差异进行识别。

(4)区内岩(矿)石的磁性差异较小,壶天群灰岩基本无磁性,白垩系砂泥岩层含铁铜等金属元素时表现出一定的磁化率,含矿岩石的磁化率则更高。

区内不同岩(矿)石较明显的物性差异,可以为开展广域电磁法工作和解释提供基础。

表1 柏坊铜矿岩(矿)石物性参数表

系	组	岩性	标本数量	电阻率		极化率	磁化率		备注
				变化范围	平均值	平均值	变化范围	平均值	
				件	$\rho/\Omega \cdot m$	$\eta/\%$	$K/4\pi \times 10^{-3} SI$		
白垩系	上统	紫红色砂岩	—	40 ~ 100	60	1.5	—	—	收集
		含水砾岩	—	40 ~ 70	60	—	—	—	
		砾岩	—	40 ~ 700	966	—	—	—	
		紫红色泥质粉砂岩	53	231 ~ 1 232	495	1.4	0.006 ~ 0.066	0.035	实测
		浅灰色粉砂岩	24	105 ~ 3 180	899	1.1	0.010 ~ 0.075	0.037	
		浅灰色含铜粉砂岩	13	11 ~ 817	289	3.3	0.014 ~ 0.156	0.076	
二叠系	斗岭组	碳质砂页岩	7	93 ~ 450	274	1.4	0 ~ 0.002	0.001	实测
		砂质页岩	—	70 ~ 100	80	8.5	—	—	收集
	当冲组	硅质页岩	—	1 370	1 370	1.5	—	—	
	栖霞组	大理岩	—	2 ~ 48 400	28 000	2.5	—	—	
石炭系	壶天群	白云质灰岩	33	90 ~ 31 000	28 000	2.5	—	—	实测
		纯方解石	12	3 557 ~ 45 194	16 455	1.0	0 ~ 0.011	0.002	
		含晶洞灰岩	28	17 539 ~ 22 928	20 655	0.4	0 ~ 0.001	0.000	
		碎裂灰岩	23	8 138 ~ 47 208	17 697	0.5	0 ~ 0.010	0.004	
		铜矿石(品位较高)	21	3 850 ~ 19 358	9 626	0.8	0 ~ 0.001	0.000	
		闪长花岗斑岩(弱风化)	6	24 ~ 980	302	7.7	0.016 ~ 0.287	0.126	
				6 937 ~ 8 514	7 369	1.6	0 ~ 0.005	0.002	

注:碎裂灰岩当岩石较破碎时电阻率低,当方解石胶结较好时电阻率高。

3 研究方法和工作布置

3.1 研究方法

广域电磁法是根据水平电流场源和垂直磁场源在半均匀空间地面的电磁场解析表达式,建立的以曲面波为核心的电磁勘探理论,构建了全息电磁勘探技术体系,实现了频率域电磁法由平面波到曲面波的理论跨越。广域电磁法将电流-频率-位置-大地电阻率-磁导率等全部信息考虑在内,用电磁场的全域精确公式提取视电阻率,增加了探测深度,同时通过一次发送包含多个频率成分且振幅接近的伪随机信号电流,提高了观测精度和效率。

本次广域电磁法测量采用人工电流源激发,观测水平电场分量。大地表面水平电偶极源的电场分量为

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\delta\gamma^3} [1 - 3\sin^2\phi + e^{-ikr(1+ikr)}] \quad (1)$$

广域视电阻率定义为

$$\rho_s = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x(ikr)}} \quad (2)$$

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN} \quad (3)$$

$$\Delta V_{MN} = E_x \cdot MN \quad (4)$$

式中: K_{E-E_x} 为装置系数; ϕ 为方位角; $F_{E-E_x(ikr)}$ 为电磁响应函数, k 为波数, $k^2 = \omega^2\mu\epsilon - i\omega\mu\sigma$; ϵ 为介电常数; μ 为磁导率; ω 为圆频率; ΔV_{MN} 为观测电位差; MN 为点距; I 为发射电流; dL 为供电极距; r 为收发距。

3.2 工作布置

广域电磁法测线尽量垂直主要含矿地层或主干

构造走向,同时兼顾有小岩体出露的地段,在控制主要控矿构造和含矿地层的同时,探测深部是否存在大型隐伏岩体及其有关的热液型矿化。

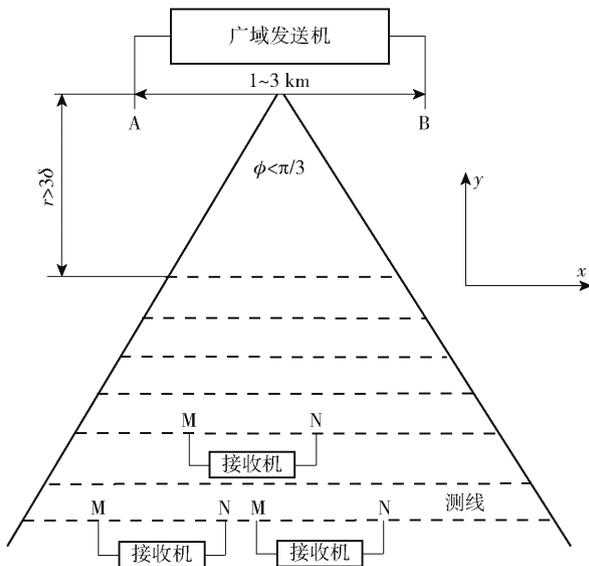
本次研究布设7条广域电磁法测量剖面,其中北东向广域电磁法剖面5条,自西向东编号为SGY1~SGY5,剖面间距500~1400 m,点距40 m,剖面与区内主干构造线基本垂直,基本覆盖柚子塘矿段、铜鼓塘矿段等;北西向广域电磁法剖面2条,自北向南编号为SGY6~SGY7,剖面间距1400 m,点距40 m,SGY6剖面控制柚子塘矿段、憩山岭背斜及 F_{11} 断裂,SGY7剖面控制矿区南部出露花岗闪长斑岩脉及 F_{26} 断裂。

4 数据采集及处理

4.1 数据采集

野外数据采集采用广域电磁法的E- E_x 装置,即采用一对接地电极形成的电流源作为场源,测量电场的水平分量中与供电电极方向平行的 E_x 分量。

场源电极(A、B)根据实际地形、地物情况,在 30° 范围内接受发射信号,AB场源近乎平行于测线方向布设,具体如图2所示,图中虚线场源①位于蓬塘村, $r \approx 8.7 \sim 12$ km, $AB \approx 1.20$ km, $MN = 40$ m,方位角 39.5° ,有效电流值100 A左右,与测线方位角误差小于 1° ;场源②位于黄桥村, $r \approx 9.3 \sim 10.8$ km, $AB \approx 0.95$ km, $MN = 40$ m,方位角 122.3° ,有效电流值107 A左右,与测线方位角误差小于 1° 。



……为广域电磁测深测线,测线到场源的垂直距离为收发距

图2 广域电磁场源与测线布置示意图(多线多排列)

4.2 数据处理

本次广域电磁法数据处理以及反演采用“地球

物理资料综合处理解释一体化系统(GME_3DI)”。首先,评价原始数据质量,并进行去噪、静态校正、数据滤波及地形校正等预处理,计算广域视电阻率;其次,进行定性分析,分析“频率-视电阻率”曲线类型,确定地下介质在曲线上的响应,分析视电阻率拟断面图,初步确定构造系统的划分和原始数据与构造区域的对应关系;再次,依据矿区地质、地球物理资料,对实测的电性断面进行地质解释,定性分析频率域的成果,进行后期反演成像与定量解释;最后,不断优化反演参数,选择最优数据处理解释方案,采取连续介质和层状介质反演,建立地质-地球物理找矿标志。

5 资料解释及地质分析

5.1 定性分析

通过综合分析研究初始成果的视电阻率曲线类型、等频率曲线图及“频率-视电阻率”拟断面图,可以有效提高定性分析的准确度。本次对广域电磁数据进行系统的处理与定量反演计算(以SGY2线为例),反演深度2000 m达到标高-1800 m。

广域电磁测量SGY2线的视电阻率测深曲线如图3(a)所示,从曲线形态上多表现为复杂的“KH”型,少量简单的“K”型、“H”型,表明视电阻率在该剖面总体上从浅到深具低→高→低→高→低→高的变化趋势,局部点位从浅到深具低→高→低或高→低→高的变化趋势。部分地段曲线形态紊乱(点138~144)代表构造发育、岩性变化或矿化蚀变导致的电性不稳定,需重点关注。统计视电阻率原始数据,发现本区背景视电阻率较大,说明本次广域视电阻率测量结果为相对视电阻率。

广域电磁测量SGY2线的视电阻率等频率曲线如图3(b)所示,反映了各频率在剖面上的变化特点,频率曲线下凹代表该处电阻率相对较低,向上突起则反映该处视电阻率相对周边较高,不同频率均表现为下凹可能代表该处断裂发育导致出现连续的低阻异常,是综合分析断裂构造的基础。

广域电磁测量SGY2线的“频率-视电阻率”拟断面如图3(c)所示,可见由浅至深的视电阻率特征大致呈现低→高→低→高变化,结合电性测试成果,推测高阻可能是碳酸盐岩地层引起,低阻则可能与白垩系砂泥岩层、斗岭组煤系地层、断裂构造、矿化蚀变、岩石破碎含水等因素有关;横向电阻率不连续和低阻纵向上成带分布说明该段可能构造较发育,

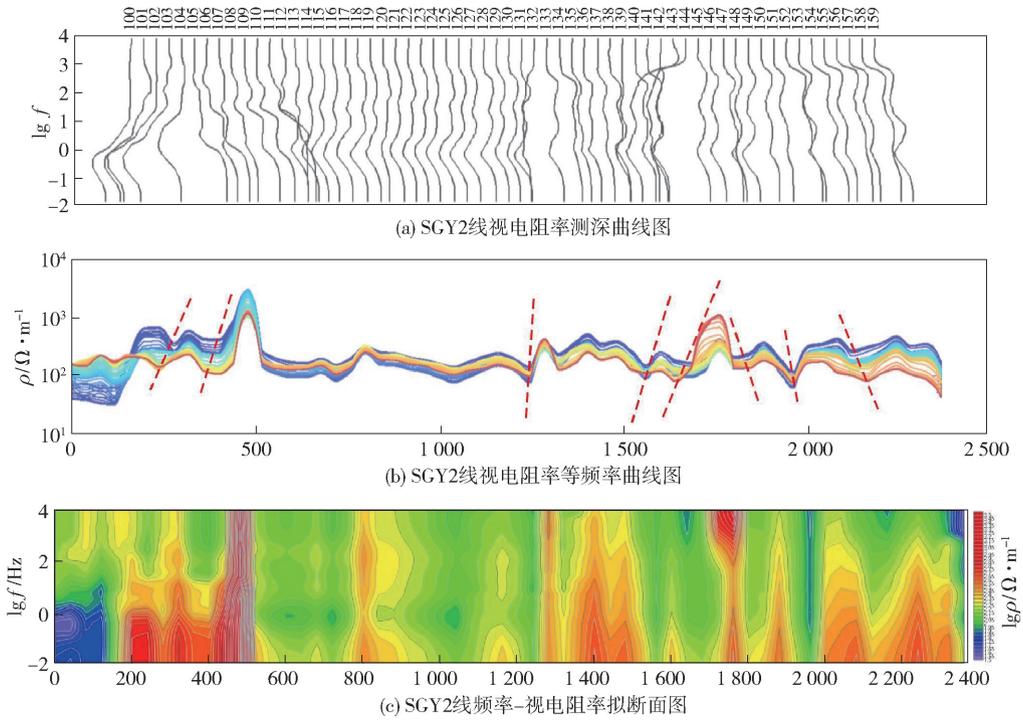


图3 SGY2线广域电磁法定性分析

视电阻率等值线密集、扭曲和畸变亦为断裂或岩浆侵入的反映。

5.2 反演解释

通过分析实测的广域电磁视电阻率,对比区内各岩(矿)石物性特征及地层柱状图,得到初始的地电模型,计算出该模型在地表的视电阻率理论值,并与实测值相对比;通过不断调整反演参数,直至理论值与实测值的最小二乘偏差达到最小,则该模型即为反演成果,它定量给出了不同电性介质在地下分布规律,反演可以通过人机交互的方法实现。

一维反演是假设地下介质的电性仅随深度发生变化,沿水平方向不变的一种反演方法,可有效避免

人为因素的影响。采用一维连续介质反演方法,假定地下介质沿深度(纵向)是连续变化的,具体如图4(a)所示,在纵向上需离散化,即用一系列薄层来描述介质的电性分布,通过最佳拟合大地电磁响应函数,可求得各个薄层的电阻率值。

二维反演是假定大地电性结构为二维的,即地下介质的电性在垂直于勘探剖面的方向上不变,而沿剖面方向和随深度发生变化的一种反演方法。本次以二维反演结果作为地质推断的主要依据,以一维连续介质反演成果作为二维连续介质反演的初始模型,在不受任何先验认识的约束下,将剖面进行薄层单元分块划分,而后进行电性拟合,求得各单元的

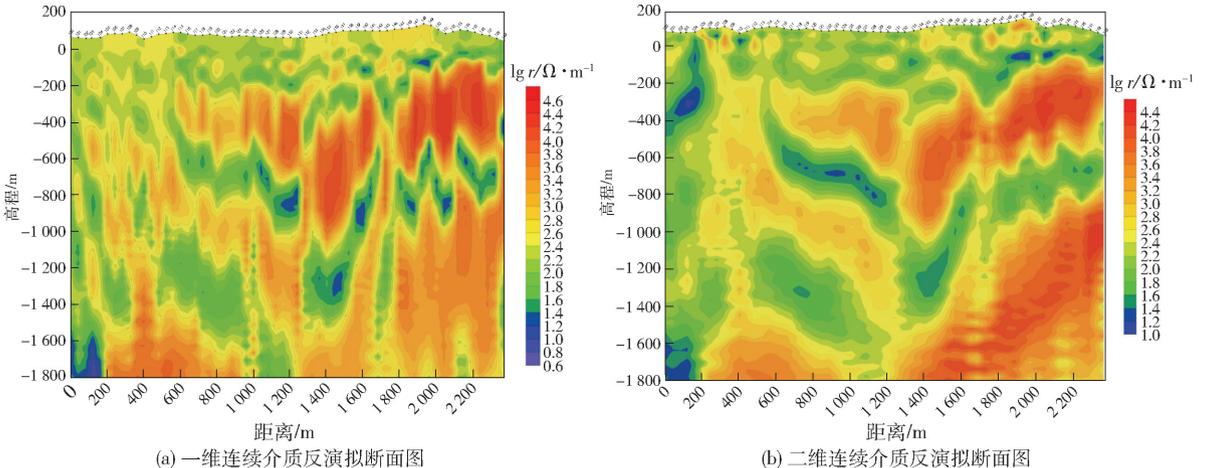


图4 SGY2线广域电磁法反演解译断面图

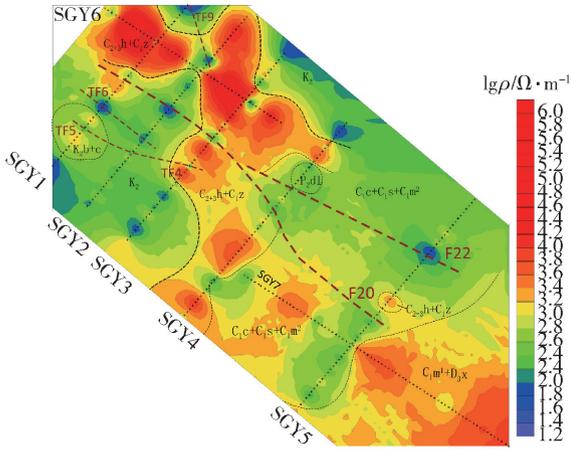
电阻率,以此进行地质解释与推断。在断面上呈现出电性分布的等值线具体如图4(b)所示。

5.3 综合解释

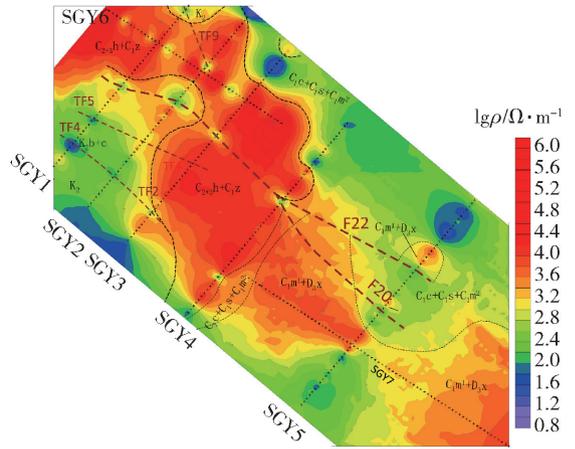
本次研究将广域电磁法的7条测线按-200 m、

-400 m、-600 m、-800 m 标高编制视电阻率等值线平面图,具体如图5所示,在平面上和高程上反映各电性异常体之间的联系与变化特征。

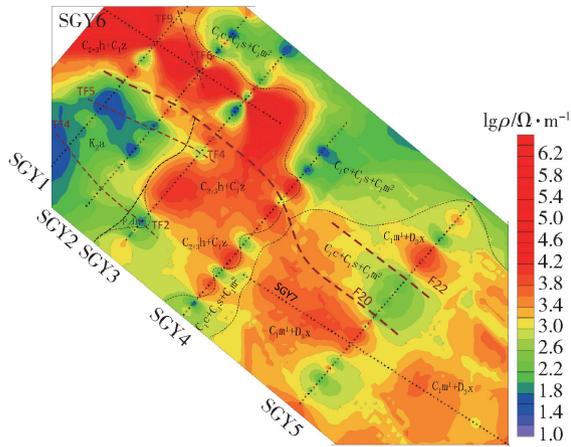
(1) 地层表现:白垩系地层主要发育于矿区西



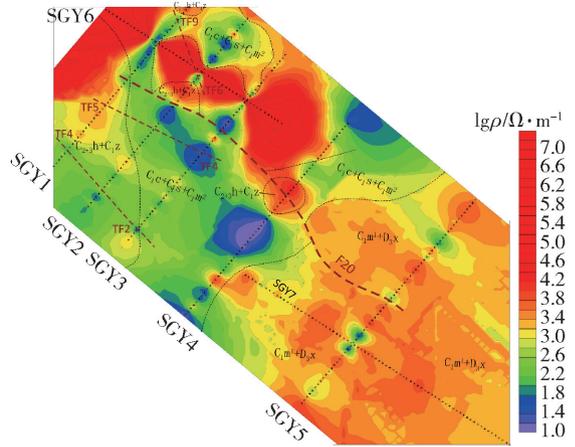
(a) 柏枋铜矿广域电磁法测量-200 m标高视电阻率等值线平面图



(b) 柏枋铜矿广域电磁法测量-400 m标高视电阻率等值线平面图



(c) 柏枋铜矿广域电磁法测量-600 m标高视电阻率等值线平面图



(d) 柏枋铜矿广域电磁法测量-800 m标高视电阻率等值线平面图

图5 柏枋铜矿广域电磁法不同标高视电阻率等值线平面图

南角和西北角,由上至下分布范围逐渐缩小;壶天群和梓门桥组灰岩主要出现在SGY4线以西、-600 m标高以内,至-800 m标高仅在2线和4线中部有零星发育,即在中部分布范围大、厚度大、埋藏深,往东深度埋藏浅、往西厚度较薄等特点;测水组及下部地层则主要发育在SGY4线以东。

(2) 断裂构造表现: F₂₀在走向和倾向上均有较明显的异常反映,SGY4线以东F₂₀发生明显转折,反映被F₁₁错断平移的特点;主控矿构造F₂₂在-600 m标高以上SGY4~SGY5线均有较好的异常体现,往西被F₁₁错断后异常特征不明显;此外,在西部SGY1~SGY3线之间可见三条平面上和高程上均较连续的断裂构造,分别为SGY1线TF₉、SGY2线TF₆(倾向SW)、SGY1线TF₅~SGY3线TF₄(倾向

NNE)、SGY1线TF₄~SGY3线TF₂(倾向S),其中断裂构造SGY1线TF₄~SGY3线TF₂与矿区主要控矿构造F₂₂展布规律基本一致,可能为与F₂₂同期的断裂构造。

通过编制SGY1~SGY5线的联合地质剖面图,可以较清晰的看到各测线上的相同地质体和构造能较好的对应连接,具体剖面如图6所示。从联合地质剖面图可以看出以下几个方面内容。

(1) 上古生界与中生界不整合接触界面呈波状起伏展布,总体上中北部深部浅、厚度大,往两侧埋深逐渐增大、厚度减小,在断裂F₂₀附近显示为被错断位移,上盘抬升、下盘下降,并在SGY1线和SGY2线错距较大,往东错距减小,SGY3线和SGY4线的厚度大、分布范围广。

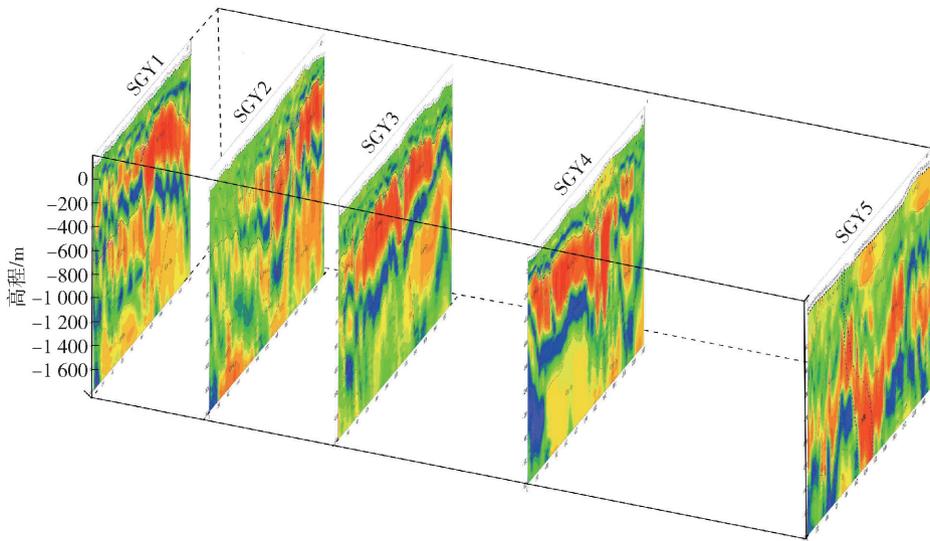


图6 柏坊铜矿广域电磁法 SGY1 ~ SGY5 线联合地质剖面图

(2) 断裂构造 F_{20} 在走向和倾向上延伸稳定, 主要控矿构造 F_{22} 在 SGY4 线和 SGY5 线有较好的电性反映, 深部被 F_{22} 错断后电性异常不明显。

(3) SGY5 线主要为测水组下部地层, 浅部仅在北面局部发育栖霞组、壶天群、梓门桥组灰岩等 high 阻电性体。

(4) SGY5 线 118 ~ 120 号测点间地表出露花岗闪长斑岩, 因出露规模较小且被风化, 表现为中低阻, 中深部往东北向陡倾角延伸, 表现为中高阻, 推测深部可能存在隐伏岩体。

5.4 分析与讨论

柏坊铜矿地处衡阳盆地南缘多构造叠加复合部位, 矿体的形成与分布受褶皱、断裂、不整合面、岩溶等控制, 综合分析区内(原生)铜矿化特征、成矿地质条件、控矿因素, 总结区内矿体的空间定位机制与规律。

(1) 研究区内主要含矿岩系为白垩系和中上石炭统壶天群, 其中, 白垩系红色碎屑岩可能为成矿提供了部分成矿物质(其铜元素含量为上地壳的 6 ~ 11 倍), 且长石石英砂岩渗透性好、孔隙度大, 加之构造活动形成的一系列节理裂隙, 以及红色碎屑岩孔隙度底、渗透性差可作为良好的遮挡层, 有利于矿液运移、赋存的成矿条件; 壶天群灰岩中古岩溶内部岩石破碎, 具有很好的容矿空间, 有利于矿液运移赋存。

(2) 研究区处于多个构造体系相交处, 早期构造控制了后期构造的形成, 后期构造在早期构造的基础上形成、发展, 成矿期及以前的构造是矿体赋存

的良好空间, 控制着矿体的形成和分布, 而成矿后期构造则对矿体起到破坏的作用。 F_{22} 断裂破碎带是区内最重要的导矿和容矿构造, 该断裂是褶皱倒转翼岩波状起伏的岩性界面推滑而形成, 由于推滑形成的滑脱空间是矿化富集的有利部位, 矿体主要赋存在断裂带内凹部位。

(3) 研究区不整合面为不规则复杂曲面, 对成矿起控制作用, 一是作为容矿构造, 不整合面下凹部位的砾岩层厚度大且裂隙发育, 是矿体赋存的有利部位; 二是作为导矿构造, 成矿物质沿不整合面下渗, 在基底岩层裂隙中聚集成矿。

(4) 研究区内岩溶发育, 主要发育于中上石炭统壶天群和下二叠统栖霞组灰岩中, 区内部分原生铜矿体明显沿中生界/上古生界不整合接触界面附近的上古生界(主要为壶天群)断裂破碎带控制的古构造岩溶系统发育。

根据广域电磁法成果, 结合矿体的空间定位机制与规律, 建立成矿地质体-地球物理找矿标志: 区内断裂构造岩石破碎、含水古岩溶、矿化蚀变显示为串珠状、带状低阻异常特征, 且断裂构造常造成地层错断, 体现为电性体被切割、错断、下拉, 可以很好的识别; 白垩系地层与古生界地层之间的不整合接触界面, 裂隙发育, 是破碎角砾岩型铜矿体赋存部位, 存在较明显的电性差异; 岩体与围岩接触界面通常存在热液蚀变, 往往具有明显的低视电阻率电性特征, 结合深部隐伏岩体具高视电阻率电性特征, 可以圈定深部隐伏岩体的空间分布。

综上, 通过岩(矿)石的电阻率特征, 可以反映

相关成矿地质体的空间形态及位置关系,在研究区内开展成矿预测工作(以SGY4线为例)。SGY4线整体电性特征表现为:浅部显示低阻,往下高阻、低阻交替出现,反映地层电性特征;多处局部低阻带状电性特征明显,电阻率曲线被下拉、切割,断裂构造带低阻带与围岩高阻体界线清晰明显,具

体剖面如图7所示。靶区甲f-1位于F₂₂与F₂₀断裂交汇部位,F₂₂断裂在该处呈弯曲低缓南倾,低阻异常范围较大、异常值较低;此外CK218、ZK4401在深部揭露F₂₂断裂破碎带并见铜矿化,综合分析认为该靶区具有较好探寻断裂破碎带充填型矿体的潜力。

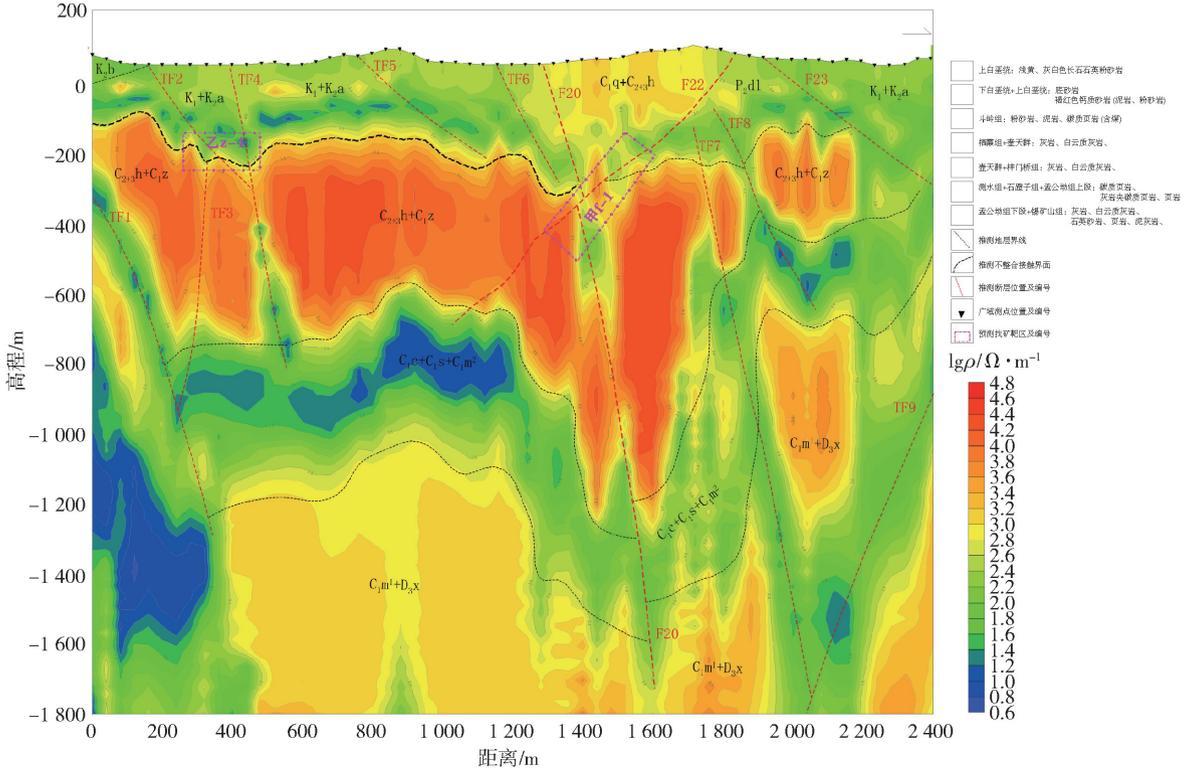


图7 柏坊铜矿广域电磁法SGY4线成矿预测剖面图

5.5 钻探工程验证情况

在SGY4线施工钻孔ZK2022-2,通过钻探工程揭露情况可看出:0~6.40m为第四系红褐色、棕黄色黏土层;6.40~65.92m为浅灰色灰岩夹黑色炭质页岩,未见矿化;65.92~369.87m为浅黄褐色、浅红褐色含方解石脉白云岩,未见矿化;369.87~472.15m为青灰色-浅灰白色含方解石脉灰岩,其中384.96~393.00m见含黄铁矿角砾及星点状辉铜矿;472.15~482.72m为角砾岩,未见矿化;482.72~594.61m为灰岩,未见矿化;594.61~596.58m为断裂破碎带,未见矿化;596.58~628.25m为白云质灰岩,未见矿化;628.25~648.23m为硅质岩,未见矿化;648.23~1107.06m为砂岩夹炭质砂页岩,未见矿化。

广域电磁法推测F₂₂与F₂₀断裂交汇部位与工程验证情况较为吻合;地层电性特征浅部显示低阻与白垩系地层对应较好,往下高阻、低阻交替出现特征

反映石炭系灰岩及裂隙带的发育,而深部低阻低极化特征相对应的砂岩夹炭质砂页岩应为二叠系斗岭组而非石炭系。综上,广域电磁法在本区地层分层及构造识别中具有较好效果。

6 结论

(1)系统总结了柏坊铜矿岩(矿)石电性特征和地质体电性规律,建立地质体电性特征空间架构;不同地层岩(矿)石具有明显的电性差异,同一地层内岩性结构变化较小电性差异小,矿石具有明显的低阻高极化电性特点与围岩差异明显;断裂构造常显示为低阻串珠状或带状异常特征。

(2)依据广域电磁法等频率曲线图、“频率-视电阻率”拟断面图、反演地质解释拟断面图及相关地质资料,开展地质解释工作,推断了区内主要地层、构造、岩浆岩等地质体的界线,揭示了区内红层盆地和基底隆起凹陷的深部形态,并对矿区东南部深处是否存在隐伏花岗闪长斑岩提供了依据。

(3)综合分析广域电磁法成果,结合矿体的空间定位机制与规律,建立成矿地质体-地球物理找矿标志,有效圈定赋矿靶区;通过钻孔工程验证,广域电磁法成果与揭露地层、构造带较为吻合,为后续找探矿工作部署提供依据。

(4)广域电磁法具有勘探深度大、观测范围广、测量精度高、抗干扰能力强等优点,较好地解决研究区干扰因素多、矿(化)体识别难度大的问题,降低了深部钻探验证的风险,为开展边深部勘查提供了较为充分的地球物理依据。

[参考文献]

- [1] 邓湘伟,戴雪灵,黄满湘.柏坊铜矿成矿规律及成矿模式探讨[J].华南地质与矿产,2008(4):22-25.
- [2] 公凡影,李永胜,甄世民,等.湖南柏坊铜矿矿床地质特征及矿床成因初探[J].矿物学报,2013(S2):152-153.
- [3] 柳智,黄满湘,马德成,等.湖南衡阳柏坊铜矿矿体地质特征及矿床成因探讨[J].南方金属,2011(5):16-25.
- [4] 吴思,张晓文,杨立志.湖南衡阳柏坊铜矿控矿因素与找矿方向分析[J].西部资源,2017(3):9-12.
- [5] 冯雨周,邵拥军,葛超,等.湖南衡阳柏坊铜矿床地质特征及成因分析[J].南方金属,2017,(2):29-31.
- [6] 宛克勇.湖南柏坊铜矿床稳定同位素地球化学初步研究[J].矿产与地质,2008,22(6):541-542.
- [7] 马德成,黄满湘,柳智,等.湖南柏坊铜矿岩溶特征及其与成矿的关系[J].资源环境与工程,2011,25(2):91-94.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王宏宇,李帝铨,柳建新,等.广域电磁法在鄂尔多斯盆地西南缘含油富集区探测中的应用[J].地球物理学进展,2020,35(3):1038-1047.
- [12] 曹彦荣,宋涛,韩红庆,等.用广域电磁法勘查深层地热资源[J].物探与化探,2017,41(4):678-683.
- [13] 李传海,闫志明.广域电磁法探测技术在采空区探测中的应用[J].矿山测量,2022,50(1):17-20.
- [14] 张金钟,刘芳芳,杨清平,等.中色非矿微震活动与爆破扰动的相关性研究[J].中国矿山工程,2022,51(2):72-78.
- [15] 刘耀文,蒋永芳,冯绍平,等.广域电磁法在上官金矿集区的应用研究[J].物探与化探,2020,44(5):1085-1092.
- [16] 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.
- [17] 王洪军,熊玉新.广域电磁法在胶西北金矿集中区深部探测中的应用研究[J].物探与化探,2020,44(5):1039-1047.
- [18] 王润生,张保涛,柳森,等.胶东牟平-乳山成矿带金青顶金矿广域电磁法探测效果分析[J].地质与勘探,2022,58(2):381-390.
- [19] 陈后扬,李帝铨,凌帆,等.朱溪钨铜矿的广域电磁法深部探测[J].中国有色金属学报,2022,32(10):3227-3243.
- [20] 王东华,田宏海,李金平,等.桦树沟铜矿微震监测台网优化方法实践与研究[J].中国矿山工程,2022,51(4):29-33.