

井中矿层多要素探测方法研究与厚覆盖区金矿勘查 试验—以皖东北五河地区为例

汪青松^{1,2,3}, 张金会^{1,2,3}, 尤森^{1,2,3}, 毛思斌^{1,2}, 产思维^{1,2}

(1. 安徽省勘查技术院,安徽合肥 230031;2. 安徽省电法勘探重点实验室,安徽合肥 230031;3. 自然资源部覆盖区深部资源勘查工程技术创新中心,安徽合肥 230001)

[摘要] 常用测井及井中物探方法划分孔内地层、推断矿层产状及盲矿体方位时,需要多次井中测量,不仅工作效率低,而且在厚覆盖区还存在矿层产状探测等难题。笔者根据金属矿低阻良导属性和充电法勘查理论,提出了一发四收充电测井法地质多要素观测系统,利用具有一发多收功能的大功率电法勘探系统,采用井-地联合观测方式,在井中连续移动充电,在地面四方位同步测量电位。试验表明,该观测系统一次井中测量,可同时完成推断矿层产状、确定矿层厚度、寻找打漏矿层、发现井傍盲矿体和孔内地层划分等多项地质任务,勘查效率高、效果好,解决了厚覆盖区矿层产状探测长期存在的难题,是一种适合厚覆盖区井中矿层地质多要素探测的新方法,具有推广意义。

[关键词] 井中物探 多要素探测 新方法试验 金矿勘查 厚覆盖区

[中图分类号] TD325.3;P631 **[文献标识号]** A **[文章编号]** 0495-5331(2021)01-0136-10

Wang Qingsong, Zhang Jinhui, You Miao, Mao Sibin, Chan Siwei. Study on the multiple-element exploration method of ore beds in wells and gold exploration experiment in the area with thick cover—Taken Wuhe area in Northeast Anhui as an example [J]. Geology and Exploration, 2021, 57(1): 0136-0145.

0 引言

众所周知,一孔之见不能确定矿层产状,金属矿钻探经常发生打漏、打偏矿层和采心率不够情况,需要应用物探测井等方法,进行矿层厚度、产状等要素探测,以寻找打漏的矿层和井傍井底盲矿体(吴明安等,2011),划分、校验钻孔地质剖面。探测地质要素多,一次井中测量难以完成,且在厚覆盖区寻找金银铜铅锌等金属矿时,还存在井中矿层产状和盲矿体方位探测难题。

金银铜铅锌等金属矿无磁性,通常具有低阻特性(董健等,2018;陆大进等,2018;张西君等,2020),众多专家学者利用金属矿层低阻良导属性,积极开展井中物探方法研究和仪器设备研制,力求解决井中矿层产状和盲矿体探测难题。

薛国强等(2007)、李貅等(2015)、刘红涛等(2018a,2018b)和底青云等(2019)长期开展瞬变电

磁法找矿理论研究,用于金属矿勘查已取得成果。武军杰等(2017a)长期开展地-井瞬变电磁法井傍盲矿体找矿方法研究,定义了电性源地-井瞬变电磁全域视电阻率,进行了定源回线瞬变电磁三分量三维反演(武军杰等,2015)、地-井 TEM 反演(杨毅等,2018)、三分量响应特征分析(武军杰等,2017b)和立体探测模拟(许颤砾等,2018),在危机矿山深部找矿中取得了应用效果(张杰等,2013),在青海省夏日哈木铜镍矿区取得了有效性试验效果(王兴春等,2015)。

李金铭(2004)长期从事激发极化法理论和方法技术研究,出版了《激发极化法方法技术指南》。众多专家学者进行了井中激电方法探测井中矿层产状方法研究,数值模拟已取得了倾斜矿体、井傍盲矿体正演数值模拟(张炯和李雪松,2010)、三维数值模拟(王志刚等,2006)和井-地三维正反演(贾定宇等,2015)研究成果,水槽实验效果好(陈海宏等,

[收稿日期] 2020-06-20; [改回日期] 2020-09-01; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 安徽省地勘基金项目“安徽省五河金矿整装勘查”(编号:2013-3-9)资助。

[第一作者] 汪青松(1959年-),男,1984年毕业于长春地质学院,获学士学位,教授级高级工程师(二级),主要从事固体矿产勘查、地球物理勘查和厚覆盖区综合找矿方法研究。E-mail:wqs5936@163.com。

[通讯作者] 张金会(1980年-),男,2010年毕业于吉林大学,获博士学位,主要从事地球物理勘查工作。E-mail:495234144@qq.com。

2014),已在新疆某矿区成功发现了井底盲矿体(安然等,2018),在陕南平利某金属矿(潘建西,2010)、新疆彩霞山铅锌矿(李建新等,2011)、老挝华潘铜铁多金属矿(徐新学等,2012)、内蒙查干布拉根银铅锌多金属矿(王耀升等,2013)勘查工作中取得了较好的应用效果。

吕庆田等(2015,2019)长期研究金属矿多尺度综合地球物理勘查理论、技术与设备,成功研发了一批重要的金属矿地球物理勘探技术与设备,特别是其中的坑-井-地电磁成像系统,有多种工作方式,可进行多参数探测,将为井中矿层地质多要素探测提供了新的技术装备。前人在井中矿层产状和盲矿体方位探测方面取得了重要成果,可惜缺乏厚覆盖区应用成果,更是未有学者开展井中矿层地质多要素探测方法研究。目前,划分孔内地层、推断矿层产状及井傍盲矿体方位,需要多次井中测量才能完成,工作效率低,且长期存在厚覆盖区井中矿层产状和盲矿体方位探测难题。

汪青松(2010)长期从事矿产勘查和覆盖区综合找矿方法研究工作,负责和参与厚覆盖区找矿项目30余个,多有井中物探工作安排,发现始终存在井中矿层产状推断难题。2013年笔者负责安徽省五河县河口金矿勘查时又遇到同样难题,早期施工的ZK2002孔在第四系厚覆盖层下前寒武纪变质岩中发现了具有重要意义的金矿层,需要判断新发现矿层的产状,以便为后续钻探工作布置提供依据。为此先后开展了三分量磁测、电阻率测井和四方位井中激电方法。因金矿层无磁性,三分量磁测自然不会发现有意义异常;电阻率测井法在矿化带部位发现了低阻异常;寄予厚望的四方位井中激电法没有获得有价值的异常,不能推断金矿层产状,主要原因是地表有第四系低阻厚覆盖层存在,屏蔽了进入基岩的供电电流,导致基岩中金矿层电场信号微弱,没有发现电位方位变化异常,不能推断矿层产状。

低阻覆盖层具有屏蔽电流作用,在厚覆盖区找矿难度大(汪青松等,2018),常规电法勘探效果差,地-井瞬变电磁法和井中激电方法存在同样难题,特别是在厚覆盖区探测井中矿层产状难度大,缺乏可供参考的成功案例。为了克服第四系低阻覆盖层屏蔽电流作用,提高矿化带电场信号,解决厚覆盖区推断井矿层产状的难题,笔者基于四方位激电法探测产状原理和充电法勘查理论(何裕盛和夏万芳,1978),经三维数值模拟后,提出了井中供电地面多点接收的一发四收充电测井法地质多要素观测系统

(简称四方位充电测井法),同步观测井中充电电流和地表电位,试验取得了较好的效果,正确推断了新发现矿化带的倾向,为河口金矿勘查最终取得找矿突破成果提供了有意义信息(汪青松等,2018)。

本文首先介绍了井中矿层地质要素探测常用的物探方法,然后重点介绍了一发四收(多收)充电测井法地质多要素观测系统原理、设备要求、试验过程与方法技术成果。

1 井中矿层地质要素探测常用物探方法

1.1 孔内地层划分常用方法

视电阻率法、激发极化法和磁化率测井等方法是划分、校验钻孔地质剖面,确定矿层边界、结构、厚度的最常用的有效方法,是行业标准《金属矿地球物理测井规范》(DZ/T 0297-2017)中指定可选方法,方法技术成熟。

1.2 井中矿层产状及盲矿体方位探测方法

1.2.1 三分量磁测井

该方法可以推断钻遇(含地质编录遗漏的)磁性体(含矿体)的厚度、产状与延伸,发现井傍井底盲磁性体(含矿体),方法技术成熟,探测效果好(刘冬节,2011;汪青松等,2012)。已发布了行业标准—《井中磁测技术规程》(DZ/T 0293-2016),但不适用于探测无磁性地质体。

1.2.2 地-井瞬变电磁法

该方法可以发现井傍盲矿体并能追踪矿体延伸方向,测量时将发射回线布置在井孔上方或附近地面上,用接收探头在钻孔中逐点测量地下介质产生的感应二次场。推断井傍盲矿体方位或井中矿层产状时,需要在地面不同方位布置多个发射回线,每个回线激发时都用探头在钻孔中测量一遍(张杰等,2013),追踪矿体延伸方向和精确定位工作效率低。

1.2.3 井中激发极化法

该方法主要用于探测金属硫化物矿层厚度、产状和寻找井傍井底盲矿体(潘和平,2013)。有地-井方位测井(地表供电、井中测量)和井-地充电测量(井中供电、地面测量)等方式,有梯度和电位测量两种接收形式(李建新等,2011)。

地-井方式,供电B极在“无穷远”处,A极以井口为中心布设在四方位地面上,各电极点(A1、A2、A3、A4)与井口距离相等。AB在地面发射电场信号,测量电极MN在井中移动,从井底到孔口逐点同步测量MN电位(梯度方式);或测量电极N在“无穷远”处,M极在井中移动,逐点同步测量M极

电位(电位测量方式)。地 - 井方式需要四方位供电,多次井中测量,工作效率低。

井 - 地方式,B 极在地面“无穷远”处,A 极在井中矿体露头上充电,测量电极 MN 在地面移动,在剖面上逐点同步测量电位(梯度方式);或 N 极在“无穷远”处,M 极地面按网度移动测量同步各点电位(电位方式)。该方式与井中充电法相同(贾定宇等,2019),地面测量工作量大,工作效率低。在深孔探测薄层矿体时,需要井中矿体露头位置准确可靠,由于孔深丈量有误差和供电线缆有伸缩性,测量时充电电极与矿体露头对接难度大,应用案例较少。

2 一发多收充电测井地质多要素观测系统

2.1 观测系统原理

这是一种井 - 地联合地球物理探测新方法,笔者称作四方位充电测井法。供电 B 极置“无穷远”处,供电 A 极在井中从井底到井口连续移动,逐点供电(充电);测量 N 极置“无穷远”处,测量 M 极同时布置在等距离井口四方位地面上,分别编号为 M1、M2、M3、M4,共用“无穷远”N 极,在 AB 供电时同步测量 4 个 M1、M2、M3、M4 电位。观测系统如图 1、图 2。

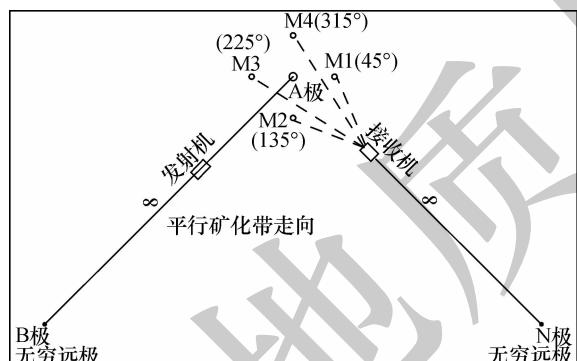


图 1 一发四收充电测井法电极平面布置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electrode layout of charging logging method with one emission and four receivers

由于供电电极 A 与低阻矿体直接接触,倾斜低阻矿层与电极一同成为等电位体或似等电位体(张兆京和朱明忠,1995),缩小了充电点与地面测量电极点的距离,地面测量电极电位将升高。倾斜矿层上端附近的电极与矿层距离相对更小,电位相对更高;倾斜矿层下端附近的电极与矿层距离相对较大,电位相对较小。通过对比不同方位电位变化特征可推断矿层产状。

数值模拟结果也是如此,模型背景电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,异常体为倾斜板状位于模型中间,电阻率 $10 \Omega \cdot m$ 。钻孔通过倾斜板状模型,模拟结果显示地表电位左右不一致,矿体上端距离地表较近,地面电位异常较高,如图 3。

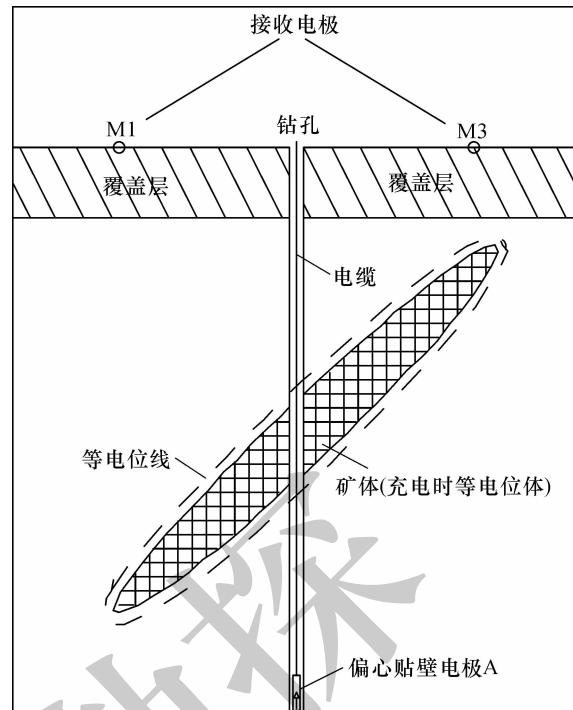


图 2 一发四收充电测井法孔内移动充电电极示意图
Fig. 2 Schematic diagram of mobile charging electrode in the hole of one emission - four receiver charging logging method

$100 \Omega \cdot m$, 异常体为倾斜板状位于模型中间, 电阻率 $10 \Omega \cdot m$ 。钻孔通过倾斜板状模型, 模拟结果显示地表电位左右不一致, 矿体上端距离地表较近, 地面电位异常较高, 如图 3。

井傍盲矿体模型, 模型背景电阻率为 $100 \Omega \cdot m$, 异常体位于模型中间, 电阻率 $10 \Omega \cdot m$, 钻孔在异常体外侧通过, 模拟结果显示地表电位左右分布不一致, 表现为矿体一侧电位异常相对高, 电位梯度相对低, 如图 4。

2.2 仪器设备要求

长期以来, 我国地球物理勘查技术和仪器严重依赖国外进口, 国产勘查技术无论仪器设备, 还是方法、软件尚不能满足日益增长的深部矿产勘查需求(吕庆田等, 2019)。国产现有的金属矿测井仪器设备, 还不能满足“一发四收充电测井地质多参数观测系统”试验要求, 只能在市场上设备中进行组合配置(其中某些无法配置的配套设备如极棒架等笔者自制解决)。主要仪器设备要求如下:

(1) 主机: 需要具有一发同步多收功能。试验时选用中装集团重庆地质仪器厂生产的激电测量系统(含 DJS - 9 接收机、DZ15 - 1A 整流电源、DJF15 - 1A 发射机、220V12KW 发电机)。该系统具有发射功率大、多台仪器同步接收功能, 接收仪器台数不

受限制,工作效率高的特点。

(2)井中线缆:要求绝缘、抗拉、大电流。试验

时选用上海一海电缆厂 RTPU 型特制绝缘铠装电缆,绝缘抗拉、能够满足 20A 以上大电流。

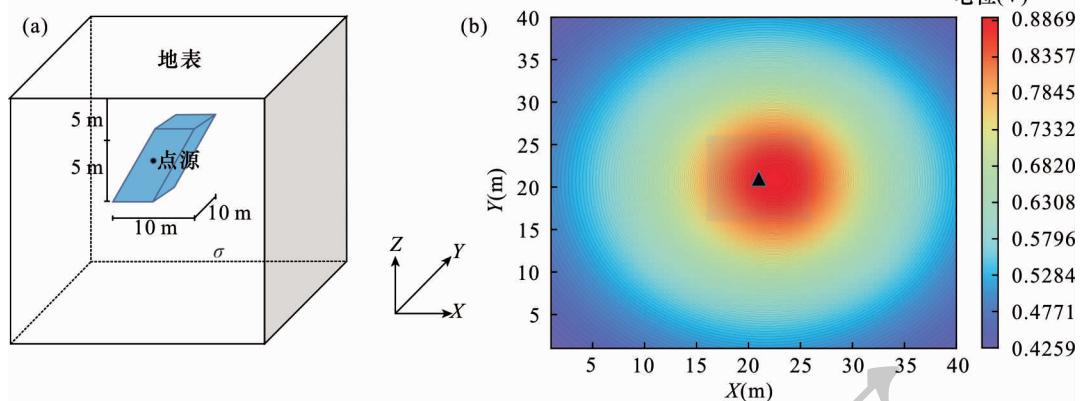


图 3 钻孔通过倾斜板状矿体模型地表电位等值线分布图

Fig. 3 Contours of surface potential through inclined plate orebody model

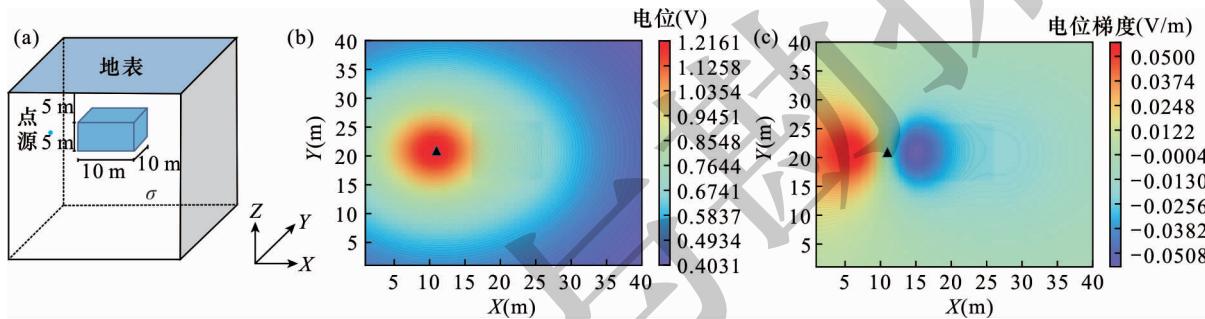


图 4 井傍盲矿体模型地表电位和电位梯度等值线分布图

Fig. 4 Contours of surface potential and potential gradients of blind orebody model near the well

(3)井中充电电极:要求是高分辨率贴壁电极:①在钻孔中始终与井壁接触;②过电能力 20 A 以上;③电极与井壁有效接触部位长度不超过 10 cm,电极其它部分不能与井壁接触而漏电,对矿层分辨率高,测量厚度误差小;④自重大、下沉速度快。市场无此设备,为此专门研制了一种长度为 1 m 的铜棒“井中偏心贴壁电极”,获专利授权。

(4)地面供电电极与供电导线,接收电极与信号线等辅助设备与常规激电方法要求相同,未作特殊要求。

3 试验钻孔地质概况与试验工作成果

3.1 试验钻孔地质概况

试验钻孔位于河口金矿勘查区内,孔号为 ZK2002。河口金矿是笔者负责发现的皖东北地区第一处中型规模以上金矿床,为石英脉-构造蚀变岩型覆盖区隐伏矿床(汪青松等,2019),该矿地

华北地台南缘淮河岸边,地表被第四系覆盖(张顺林等,2018),下伏地层为前寒武纪五河岩群变质岩。

ZK2002 孔深度 650.15 m,上部第四系厚度 98.65 m,主要岩性为粘土和粉细砂,地层结构松散,富含地下水,电阻率低。下部为五河岩群变质岩至孔底,主要岩性有斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩、石英角闪片麻岩、角闪岩等;在孔深 378.18 ~ 388.95 m 处发现了重要的金矿化带(为含金矿化构造蚀变带,称金矿层),视厚度 10.77 m。矿化带中主要岩性为硅化、绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化蚀变的斜长角闪片麻岩,构造裂隙发育,并充填有方铅矿细脉和石英脉,矿化带平均含量 Pb 3.2%、Au 0.74 g/t,最高含量 Pb 72.9%、Au 9.17 g/t。

3.2 野外工作方法与要求

电极布设:如图 1、图 2,供电电极 AB 分别布设在井中(A 极)和“无穷远”处(B 极)。为了便于推断矿层产状,要求供电线 OB 大致平行矿化带走向

布设，“无穷远”B 极使用铜编织带，埋入土中，确保大电流供电和安全防范措施有效。充电 A 极使用自制铜棒“贴壁电极”，并与绝缘铠装电缆连接，置入井中。测量电极 MN 在地面，M 极同时布设在井口外围 4 个方向上，N 极布设“无穷远”处。要求“无穷远”N 极布设方向垂直“无穷远”B 极布设方向，即 ON 垂直 OB。测量电极 M 共有 4 个（M1、M2、M3、M4），以井口（O 点位置）为中心，OB 为 180° 方向（BO 为 0° 方向），分别布设在距井口 100 m 处的四个方位上（ 45° 、 135° 、 225° 、 315° ）。测量电极均使用固体不极电极，埋入土中。

数据采集：观测前由钻机水泵用清水冲洗钻孔，提高孔液电阻率。观测时 A 极（供电电极）先下至孔底，然后从孔底开始向上移动，500V 稳压逐点充电，充电点距 5 m，异常段点距 1 m，充电时间 4 秒。

实时测量发射电流与电压，同步测量地面 M1、M2、M3、M4 电位。

3.3 资料处理

3.3.1 电压归一化处理，绘制电位/电流异常图

由于供电电压难以保持 500V 稳定，需要对测量电位和供电电流进行电压归一化处理，消除供电电压变化引起的影响。根据供电时各测点实际输出电压的高于或低于 500V 时的变化幅度，等比例调整各测点充电电流和地面电位数值，均统一到 500V 的电压条件。以充电时电极深度为纵坐标，以同步测量经归一化改正后各方向电位为横坐标，分别绘制 45° 、 135° 、 225° 、 315° 方向的孔深 - 电位异常图（图 5a）；以经归一化改正后充电电流为横坐标，绘制孔深 - 电流异常图（图 5c）。

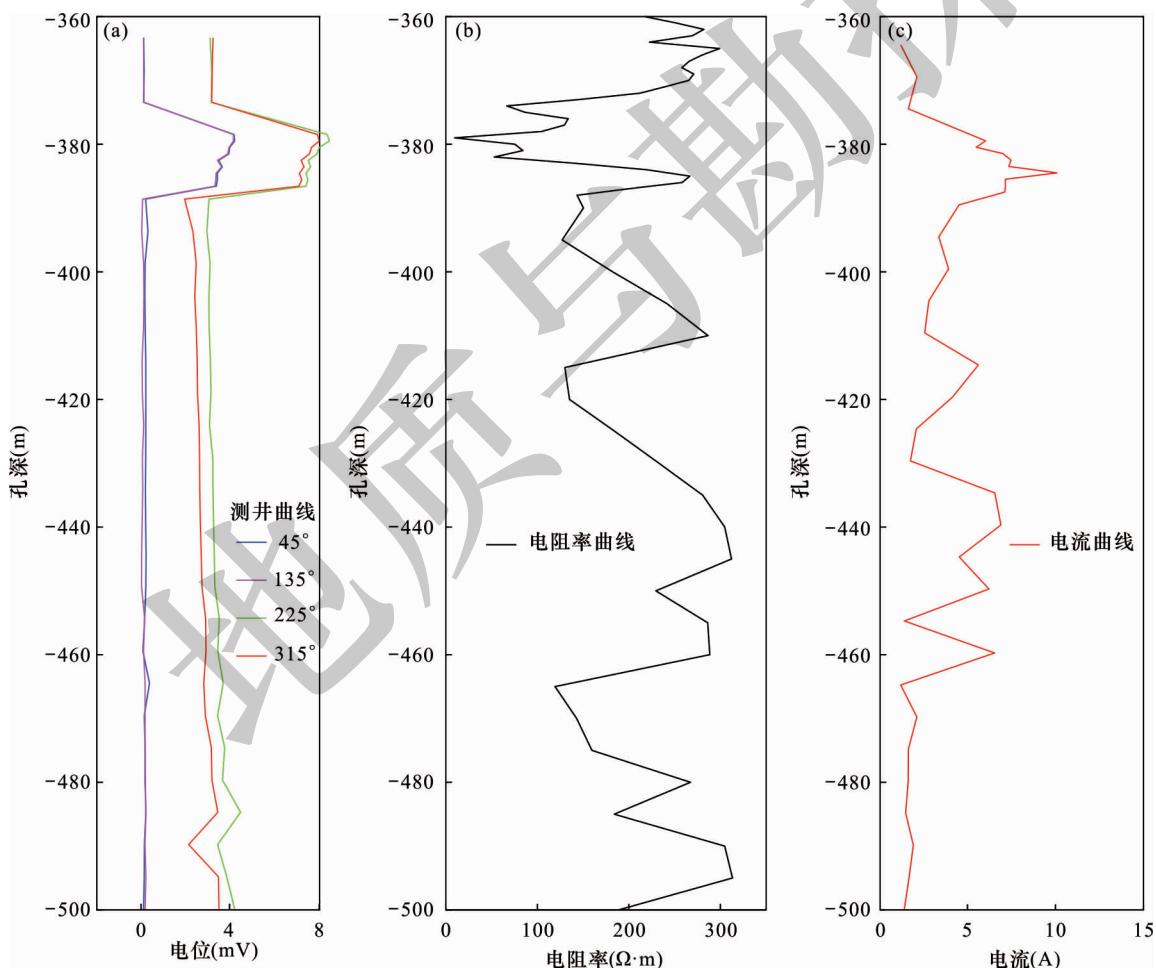


图 5 ZK2002 四方位电位异常、电阻率测井异常、充电电流异常对比图

Fig. 5 Comparison offour – azimuth potential anomalies, resistivity logging anomalies and charging current anomalies in well ZK2002

a – 充电测井法电位曲线（mV）；b – 电阻率法异常曲线（ $\Omega \cdot m$ ）；c – 电流曲线（A）

a – charging logging potential curve (mV); b – resistivity anomaly curve ($\Omega \cdot m$); c – current curve (A)

3.3.2 计算剩余电位异常,绘制剩余电位异常图

计算剩余电位异常,可以消除系统性误差。由于“无穷远”N极和“无穷远”B极不能真正放置在无穷远处,M1、M2、M3、M4与“无穷远”供电B极距离和与“无穷远”测量N极距离均不相等,在相同供电电压条件下,会导致各方向测量的电位不相等,存在装置系统误差;地质结构也具有不均匀性,地层中电阻率各方向不同,也会导致各方向测量的电位不同,存在地质结构系统误差。系统误差主要表现为

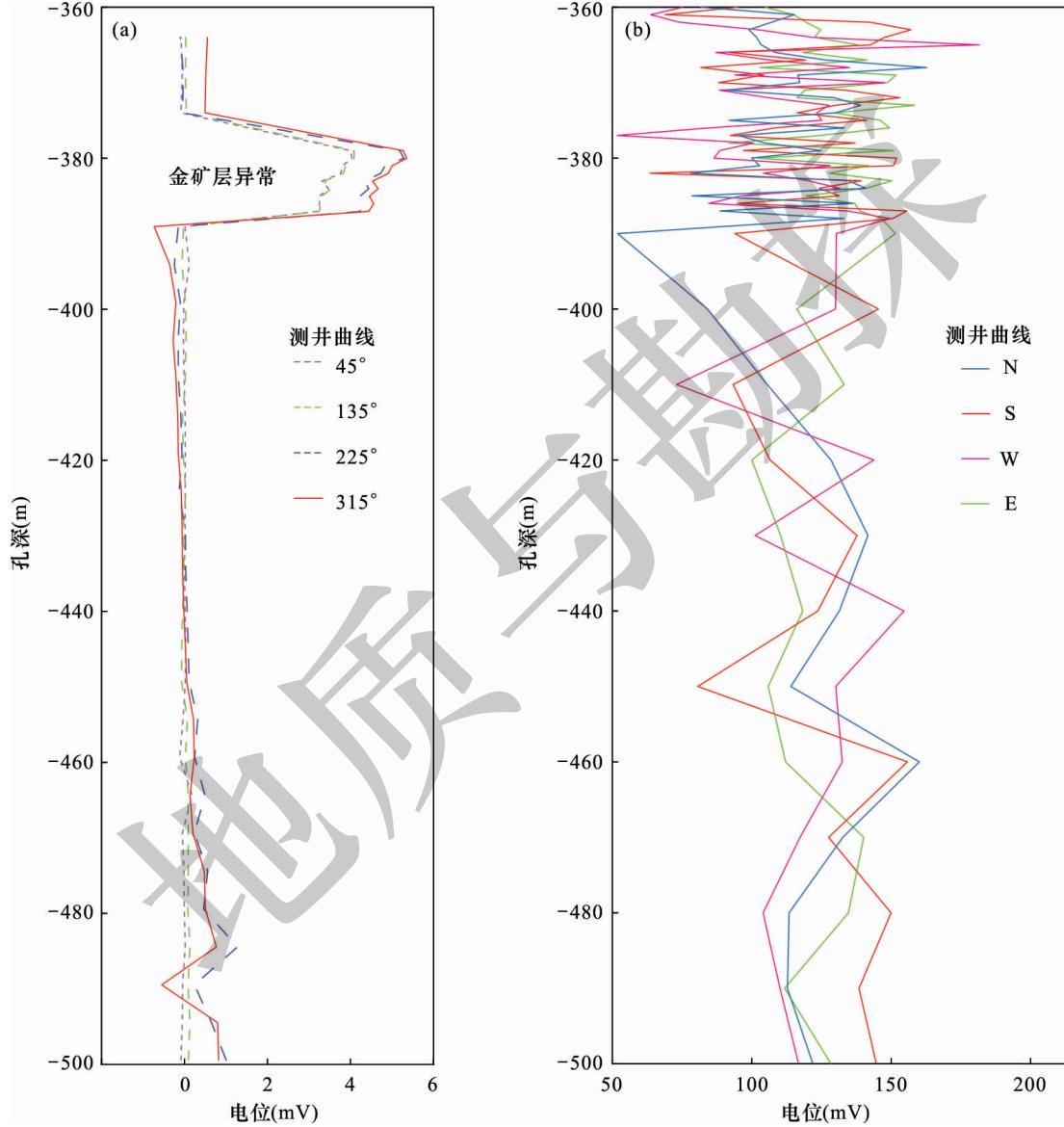


图6 ZK2002 充电测井法剩余电位异常与井中激电法电位异常对比图

Fig. 6 Comparison of residual potential anomalies of charging logging method and IP method in well ZK2002

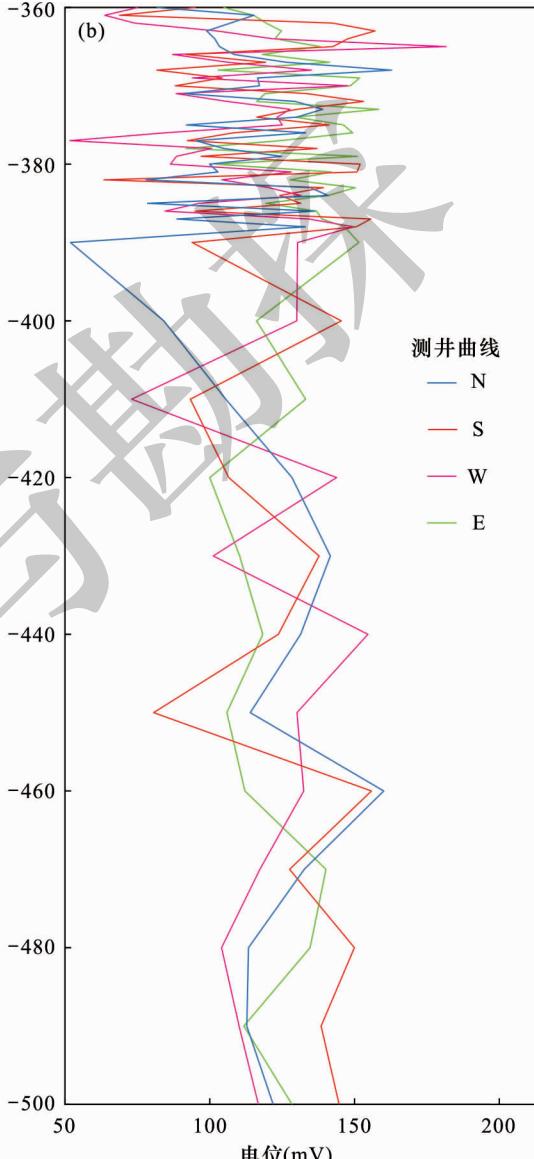
a - 充电测井法剩余电位异常曲线;b - 井中激电法电位异常

a - residual potential anomaly curve of charging logging method;b - abnormal potential of IP method in well

3.4 异常解释与试验效果评价

在孔深-电位异常图上(图5a),孔深378~

各方向的电位背景值差异,如图5a中225°和315°方向的电位明显高于45°、135°方向的电位,这种情况属于系统性误差引起,与矿化带无关,通过计算剩余电位异常方法即可消除。剩余电位异常计算方法是:各方向剩余电位异常=实测电位异常-矿化带异常区外平均电位异常(即异常背景值)。为了便于比较各方向剩余电位异常大小,将4个方向异常背景值进行平均再归零,以孔深为纵坐标绘制了四方位孔深-剩余电位异常图(图6a)。



389 m处有一个明显的电位升高异常,强度大,边界清楚,由已知378.18~388.95 m处低阻矿化带(金

矿层)引起,异常上下边界距离即为矿层厚度(约 11 m),与钻探确定的矿层位置和厚度(10.77 m)基本一致,常规电阻率测井法在此处同样存在低电阻率异常(参见图 5b),说明根据新方法电位异常解释的矿层位置和厚度正确、效果好。

在孔深-电流异常图(图 5c)上,在孔深 378~389 m 处也有电流升高异常,且还有薄层良导矿体引起的跳跃异常存在,客观反映了矿化带电性结构存在不均匀性的实际情况。此外,电流异常与视电阻率异常具有镜像对称相似特征,表明电流异常可以代替电阻率异常进行孔内地质结构分层解释。

在孔深-剩余电位异常图(图 6a)上,378~389 m 处剩余电位异常解释为是由低阻矿化带引起,剩余电位异常值高表明矿化带埋藏浅,剩余电位异常值低表明矿化带埋藏深,矿层倾向剩余电位低方向。ZK2002 孔 225°(M3) 和 315°(M4) 方向剩余电位高,45°(M1)、135°(M2) 方向剩余电位低,矿层产状是由 M3、M4 倾向 M1、M2 方向。后经河口金矿勘查成果证实,推断矿化带倾向与实际情况一致。四方位激电测井法孔深电位(梯度)异常图(图 6b)上,378.18~388.95 m 处低阻矿化带(金矿层)在 E、S、W、N 四个方向无明显异常区别,分不出各方向异常高低,不能推断矿化带产状。说明新方法在厚覆盖区探测矿化带产状效果好,而常规井中激电法则不能探测矿化带产状。

4 结论与建议

地球物理勘探技术是深部矿产资源勘查的主要技术手段,井中物探技术在油气、煤田等勘探领域都发挥了极其重要作用,但是在金属矿勘查工作中还存在效率低和厚覆盖区找矿难度大等难题。金属矿勘查理论需要不断创新,仪器装备需要不断升级,方法技术需要不断进步。井中矿层多要素探测方法研究成果提供了有益启示,总结了以下 4 个方面的结论与建议:

(1)一发四收充电测井法多要素观测系统,一次井中测量可获得多要素地质成果,同时完成矿层位置、厚度确定,推断矿层产状、寻找打漏的矿层和孔内地质结构分层任务,工作效率高,解决了厚覆盖区矿产勘查工作中长期存在的井中低阻矿层产状探测难题。

(2)通过低阻良导等电位体电场分布理论分析和数值模拟计算,一发四收充电测井多要素观测系

统既能探测井中矿层产状,也能发现井傍低阻盲矿体。据试验获得的物探异常推断矿层产状已得到验证,表明寻找井傍低阻盲矿体也会有效,该方法是穿透低阻厚覆盖层找矿有效方法之一。

(3)一发四收充电测井法地质多要素观测系统设备组成包括具有一发多收功能的大功率主机系统、高分辨率贴壁电极和大电流井中绝缘电缆等关键仪器设备;井-地联合观测方式,井中逐点或连续移动电极供电,地面同步四方位(或更多方位)测量电位,获得地面电位和井中供电电流参数,更多方位测量效果将会更好。

(4)目前,国产金属矿测井仪器设备还不能满足“一发四收(或多收)充电测井地质多要素观测系统”工作要求,可用大功率激电测量系统或坑-井-地电磁成像系统与关键辅助设备组合替代,积极开展国产设备遴选和组合试验工作。

[References]

- An Ran, Deng Chuang, Qi Xinghua, Xiang Yi, Zhang Fengwei, Li Jinbo. 2018. Application of ground-well induced polarization method to determine bottom hole blind orebody[J]. Coal Technology, 37(12): 106~108 (in Chinese with English abstract).
- Chen Haihong, Ma Huolin, Yang Zhicheng. 2014. The surface-borehole IP model experiments[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 11(5): 635~638 (in Chinese with English abstract).
- Di Qingyun, Zhu Rixiang, Xue Guoqiang, Yin Changchun, Li Xiu. 2019. New development of the electromagnetic (EM) methods for deep exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(6): 2128~2138 (in Chinese with English abstract).
- Dong Jian, Chen Lei, Zhang Guili. 2018. Characteristics of geophysical fields around gold deposits in the Xiadian region, Shandong Province[J]. Geology and Exploration, 54(1): 138~147 (in Chinese with English abstract).
- He Yusheng, Xia Wanfang. 1978. Charging method[M]. Beijing: Geological Publishing House: 68~70 (in Chinese).
- Jia Dingyu, Li Yang, Lin Zhenzhou. 2015. Three-dimensional forward and reverse modeling of well ground induced polarization[C]. Annual meeting of Chinese geoscience union (CGU): 696 (in Chinese).
- Jia Dingyu, Wang Yuhang, Wang Guimei, Gao Wenli, Feng Jie, Ding Zongbao, Ou Yang, Li Yang, Liu Dongming. 2019. The application of a new device of borehole induced polarization to the copper-gold deposit[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(6): 1205~1210 (in Chinese with English abstract).
- Lai Jin, Liu Bingchang, Feng Qingfu, Pang Xiaoqiao, Zhao Taiping, Wang Guiwen, Wang Shuchen, Chen Jing. 2020. Well logging identification and evaluation of depositional microfacies in dolostones from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in the Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1551~1567 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiangxin, Wang Yun, Zhang Zheng. 2011. Application of well induced

- polarization to Caixiashan lead - zinc mine [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 8 (2) : 192 - 199 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinming. 2004. Technical guide of induced polarization method [M]. Beijing: Geological Publishing House; 3 - 6 (in Chinese).
- Li Xiu, Zhang Yingying, Lu Xushan, Yao Weihua. 2015. Inverse synthetic aperture imaging of ground - airborne transient electromagnetic method with a galvanic source [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58 (1) : 277 - 288 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongjie. 2011. The utilization of the vertical component and the horizontal component module difference of the borehole three - component magnetic anomaly to conduct 2D fitting calculation, inference and interpretation for lateral anomalies [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 35 (5) : 617 - 619 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Di Qingyun, Xue Guoqiang, Luo Xiaonan, Ding Yunhe, Wang Chunyong. 2018a. The metamorphic core complex in the Xiaoshan gold - polymetallic concentrating area of Henan Province and its implications for mineral exploration [J]. Geology and Exploration, 54 (2) : 230 - 242 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Di Qingyun, Xue Guoqiang, Wang Ruiting, Gao Jusheng, Guo Wenbo, Zhou Nannan. 2018b. Discussion on the ore - controlling factors of lead - zinc deposits in the Feng - Tai area, Shaanxi Province [J]. Geology and Exploration, 54 (5) : 902 - 916 (in Chinese with English abstract).
- Lu Dajin, He Jiaguo, Li Yujie, Mao Sibin. 2016. Features of physical property parameters of the Lower Wuhe (rock) Group [J]. Geology of Anhui, 26 (1) : 49 - 53 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Dong Shuwen, Tang Jingtian, Shi Danian, Chang Yinfo. 2015. Multi - scale and integrated geophysical data revealing mineral systems and exploring for mineral deposits at depth: A synthesis from SinoProbe - 03 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58 (12) : 4319 - 4343 (in Chinese with English abstract).
- Lü Qingtian, Zhang Xiaopei, Tang Jingtian, Jin Sheng, Liang Lianzhong, Niujianjunwang Xuben, Lin Pinrong, Yao Changli, Gao Wenli, Gu Jiansong, Han Liguo, Cai Yaoze, Zhang Jinchang, Liu Baolin, Zhao Jinhua. 2019. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62 (10) : 3629 - 3664 (in Chinese with English abstract).
- Pan Heping. 2013. The role of borehole induced polarization / resistivity method in the exploration of mineral resources [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 37 (4) : 620 - 626 (in Chinese with English abstract).
- Pan Jianxi. 2010. Application of electrical logging in the metallic ore exploration [J]. Northwestern Geology, 43 (2) : 190 - 194 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingsong. 2010. Study on comprehensive ore - prospecting method applied in the Qianchang - Xulou covered area, HuaiBei, Anhui Province [J]. Geology of Ahui, 20 (3) : 206 - 212 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingsong, Cui Xianwen, Zhang Kai, Xu Chuanjian, Zhang Shunlin, Chan Siwei, Zhang Jiajia, He Liuchang, Cheng Peisheng, Hong Da-jun, Li Zhuang, Liu Dongjie, Wang Wei, Zhao Jinghuai, Xiong Hualong, Zhang Jinhui, Lu Dajin, Wu Mingan, Zhan Shuangqing, Zhang Zhongjiu, Ma Dong, Mao Sibin, Zhu Yikun, Lu Xing, You Miao, Liu Guoqing, Wu Suyuan, Wang Zhishui, Hao Shuxi, Zhang Jianming, Zhang Lingling, Bi Huiting, Zhu Junbo, Yang Shengxian, Ma Xuejing. 2018. Research and practice of comprehensive prospecting model in thick overburden area [M]. Beijing: Geological Publishing House; 236 - 237 (in Chinese).
- Wang Qingsong, Wu Mingan, Yuan Ping, He Liuchang. 2012. Characteristics of gravity and magnetic anomalies in the Nihe iron deposit of Lujiang County, Anhui Province [J]. Geology and Exploration, 48 (1) : 148 - 154 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qingsong, Zhang Jiajia, Zhang Shunlin, Zhu Yikun, Zhang Jinhui, Hao Shuxi. 2019. Important discoveries in Wuhe integrated exploration gold mine area in Anhui Province and its geological significance [J]. Geological Survey of China, 6 (2) : 26 - 33 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xingchun, Dou Zhi, Zheng Xueping, Deng Xiaohong, Li Lei, Wu Junjie, Zhang Jie, Yang Yi. 2015. The method effective experiment of transient electromagnetic in Xiarihamu nickle copper [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 39 (4) : 733 - 737 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yaosheng, Liu Bin, Song Shuangquan, Sui Rui, Wang Jian. 2013. Application of the borehole IP in the Chaganbulagen Ag - Pb - Zn polymetallic deposit, Inner Mongolia [J]. Mineral Exploration, (4) : 453 - 457 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhigang, He Zhanxiang, Liu Yi. 2006. Research of three - dimensional modeling and anomalous rule on borehole - ground DC method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 3 (2) : 87 - 92 (in Chinese with English abstract).
- Wu Mingan, Wang Qingsong, Zheng Guangwen, Cai Xiaobing, Yang Shixue, Di Qinsong. 2011. Discovery of the Nihe iron deposit in Lujiang, Anhui, and its exploration significance [J]. Acta Geologica Sinica, 85 (5) : 802 - 809 (in Chinese with English abstract).
- Wu Junjie, Li Xiu, Zhi Qingquan, Qi Zhipeng, Guo Jianlei, Deng Xiaohong. 2017a. Analysis of three component TEM response characteristic of electric source dill hole TEM [J]. Progress in Geophysics, 32 (3) : 1273 - 1278 (in Chinese with English abstract).
- Wu Junjie, Li Xiu, ZhiQingquan, Qi Zhipeng, Guo Jianlei, Deng Xiaohong, Zhang Jie, Wang Xingchun, Yang Yi. 2017b. Full field apparent resistivity definition of borehole TEM with electric source [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60 (4) : 1595 - 1605 (in Chinese with English abstract).
- Wu Junjie, Zhi Qingquan, Li Xiu, Yang Yi, Wang Xingchun, Zhang Jie, Deng Xiaohong. 2015. 3D inversion method of fixed - loop TEM with three - component pure anomaly response [J]. Progress in Geophysics, 30 (6) : 2827 - 2835 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Kun, Zou Changchun, Lu Zhenquan, Li Hongxing, Qin Zhen, Ge Kunpeng. 2020. The acoustic log method of estimating gas hydrate saturation in gas hydrate reservoirs [J]. Acta Geologica Sinica, 94 (5) : 1664 - 1674 (in Chinese with English abstract).

- Xu Xinxue, Li Rongguang, Sun Lei, Chang Xiangguang. 2012. The application of comprehensive 5 - direction IP logging to the exploration of a copper - iron polymetallic deposit in Houaphan Province, Laos[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 36(1):23 - 26 (in Chinese with English abstract).
- Xu Haoli, Wang Daqing, Liu Zhixin, Deng Zhengdong, Yu Jingcun, Ding Zhibin. 2018. Numerical and physical simulation of surface - underground stereo probing by the transient electromagnetic method [J]. Geology and Exploration, 54(3):603 - 613 (in Chinese with English abstract).
- Xue Guoqing, Li Xiu, Di Qingyun. 2007. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics, 22 (4):1195 - 1200 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yi, Zhi Qingquan, Deng Xiaohong, Wang Liyan, Zhang Jie, Wu Junjie, Wang Xingchun. 2018. Anomalous field extraction based on layered earth response and filament inversion technique of borehole TEM[J]. Progress in Geophysics, 33 (5):2048 - 2055 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Li Xiaohui, Zhang Mingming, Zhou Taofa, Gao Daoming, Hong Dongliang, Liu Xiaoming, Wang Qinian, Zhu Jiangbo. 2014. Three dimension prospectivity modelling based on integrated geoinformation for prediction of buried orebodies [J]. Acta Geologica Sinica, 88(4):630 - 643 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Kong Yuanzheng, Yuan Guoxia, Geng Xiangfeng, Wan Xiaolei, Miao Degang. 2019. Application of voxler platform in 3D visualization of coal mine water yield exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 93(S01):310 - 313 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Deng Xiaohong, Guo Xin, Wu Junjie, Wang Xingchun. 2013. Typical cases of applying borehole TEM to deep prospecting in crisis mines [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 37 (1):30 - 34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiong, Li Xuesong. 2010. Forward numerical modeling of surface electrical potential distribution by the borehole - to - surface mise - a - la - masse method [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 32 (3):284 - 291 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shunlin, Wang Qingsong, Zhu Yikun. 2018. Gold ore control conditions and prospecting target in the eastern Anhui area[J]. Geology of Anhui, 28(1):17 - 22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xijun, Mengyinghualiu Jun, Qu Niannian, Li Jiabin. 2020. Research of electrical characteristics and prospecting rules of gold deposit in Wanrendong area of Guizhou Province[J]. Geological Survey of China, 7(2):39 - 44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaobo, Wang Chengshan, Wang Zhihui, Li Hailong, Li Weirong, Wang Qiangmao. 2019. Shallow geophysical exploration and stratigraphic properties analysis of the Tonghu ecological smart zone, Guangdong Province[J]. Acta Geologica Sinica, 93 (11):2935 - 2946 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaojing, Zhu Mingzhong. 1995. Study on the application of deep charging and other comprehensive geophysical prospecting methods in Xinjiang[J]. Mineral Resources and Geology, 9 (5):344 - 347 (in Chinese with English abstract).

[附中文参考文献]

- 安然, 邓闯, 齐兴华, 向昱, 张峰玮, 李金波. 2018. 地 - 井激发极化法确定井底盲矿体的应用[J]. 煤炭技术, 37 (12):106 - 108.
- 陈海宏, 马火林, 杨志成. 2014. 地一井方式井中激电模型实验[J]. 工程地球物理学报, 11 (5):635 - 638.
- 底青云, 朱日祥, 薛国强, 殷长春, 李貅. 2019. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J]. 地球物理学报, 62 (6):2128 - 2138.
- 董健, 陈磊, 张贵丽. 2018. 山东夏甸地区金矿床地球物理场特征[J]. 地质与勘探, 54 (1):138 - 147.
- 何裕盛, 夏万芳. 1978. 充电法[M]. 北京: 地质出版社; 68 - 70.
- 贾定宇, 李洋, 林振洲. 2015. 井中激发极化井 - 地三维正反演研究[C]. 中国地球科学联合学术年会:696.
- 贾定宇, 王宇航, 王桂梅, 高文利, 冯杰, 丁宗保, 欧洋, 李洋, 刘东明. 2019. 一种新型井中激电装置在铜金矿上的应用[J]. 物探与化探, 43 (6):1205 - 1210.
- 赖锦, 刘秉昌, 冯庆付, 庞小娇, 赵太平, 王贵文, 王抒忱, 陈晶. 2020. 鄂尔多斯盆地靖边气田马家沟组五段白云岩沉积微相测井识别与评价[J]. 地质学报, 94 (5):1551 - 1567.
- 李建新, 王云, 张征. 2011. 井中激电在新疆彩霞山铅锌矿区的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 8 (2):192 - 199.
- 李金铭. 2004. 激发极化法方法技术指南[M]. 北京: 地质出版社; 3 - 6.
- 李貅, 张莹莹, 卢绪山, 姚伟华. 2015. 电性源瞬变电磁地空逆合成孔径成像[J]. 地球物理学报, 58 (1):277 - 288.
- 刘冬节. 2011. 利用井中三分量磁测异常垂直分量及水平分量模差对旁侧异常进行二维拟合计算推断解释[J]. 物探与化探, 35 (5):617 - 619.
- 刘红涛, 底青云, 薛国强, 罗小南, 丁云河, 王春永. 2018a. 河南省崤山金多金属矿集区控矿构造分析与思考[J]. 地质与勘探, 54 (2):230 - 242.
- 刘红涛, 底青云, 薛国强, 王瑞廷, 高菊生, 郭文波, 周楠楠. 2018b. 陕西凤太地区铅锌矿床关键控矿要素探讨[J]. 地质与勘探, 54 (5):902 - 916.
- 陆大进, 何家国, 李玉洁, 毛思斌. 2016. 下五河岩群物性参数特征[J]. 安徽地质, 26 (1):49 - 53.
- 吕庆田, 董树文, 汤井田, 史大年, 常印佛. 2015. 多尺度综合地球物理探测: 揭示成矿系统、助力深部找矿—长江中下游深部探测(SinoProbe - 03)进展[J]. 地球物理学报, 58 (12):4319 - 4343.
- 吕庆田, 张晓培, 汤井田, 金胜, 梁连仲, 牛建军, 王绪本, 林品荣, 姚长利, 高文利, 顾建松, 韩立国, 蔡耀泽, 张金昌, 刘宝林, 赵金花. 2019. 金属矿地球物理勘探技术与设备: 回顾与进展[J]. 地球物理学报, 62 (10):3629 - 3664.
- 潘和平. 2013. 井中激发极化法在矿产资源勘探中的作用[J]. 物探与化探, 37 (4):620 - 626.
- 潘建西. 2010. 井中激电测井在金属矿勘探中的应用[J]. 西北地质, 43 (2):190 - 194.
- 汪青松. 2010. 安徽省淮北前常—徐楼覆盖区综合找矿方法研究[J]. 安徽地质, 20 (3):206 - 212.
- 汪青松, 崔先文, 张凯, 许传建, 张顺林, 严思维, 张家嘉, 何柳昌, 程培生, 洪大军, 李壮, 刘东节, 王伟, 赵景怀, 熊化龙, 张金会, 陆大进, 吴明安, 战双庆, 章中九, 马冬, 毛思斌, 朱义坤, 鲁杏, 尤森, 刘国庆, 吴肃元, 王芝水, 郝树曦, 张建明, 张玲玲, 毕惠亭,

- 朱俊波,杨胜贤,马雪静. 2018. 厚覆盖区综合找矿模式研究与实践 [M]. 北京: 地质出版社, 236–237.
- 汪青松, 吴明安, 袁平, 何柳昌. 2012. 安徽省庐江县泥河铁矿重磁异常特征 [J]. 地质与勘探, 48(1): 148–154.
- 汪青松, 张家嘉, 张顺林, 朱义坤, 张金会, 郝树曦. 2019. 安徽五河金矿整装勘查的重要发现及其地质意义 [J]. 中国地质调查, 6(2): 26–33.
- 王兴春, 窦智, 郑学萍, 邓晓红, 李磊, 武军杰, 张杰, 杨毅. 2015. 夏日哈木铜镍矿区瞬变电磁法有效性试验 [J]. 物探与化探, 39(4): 733–737.
- 王耀升, 刘斌, 宋双全, 孙睿, 王俭. 2013. 井中激电法在内蒙查干布拉根银铅锌多金属矿的应用 [J]. 矿产勘查, (4): 453–457.
- 王志刚, 何展翔, 刘昱. 2006. 井地直流电法三维数值模拟及异常规律研究 [J]. 工程地球物理学报, 3(2): 87–92.
- 吴明安, 汪青松, 郑光文, 蔡晓兵, 杨世学, 狄勤松. 2011. 安徽庐江泥河铁矿的发现及意义 [J]. 地质学报, 85(5): 802–809.
- 武军杰, 李貅, 智庆全, 戚志鹏, 郭建磊, 邓晓红. 2017. 电性源地–井瞬变电磁法三分量响应特征分析 [J]. 地球物理学进展, 32(3): 1273–1278.
- 武军杰, 李貅, 智庆全, 戚志鹏, 郭建磊, 邓晓红, 张杰, 王兴春, 杨毅. 2017. 电性源地–井瞬变电磁全域视电阻率定义 [J]. 地球物理学报, 60(4): 1595–1605.
- 武军杰, 智庆全, 李貅, 杨毅, 王兴春, 张杰, 邓晓红. 2015. 定源回线瞬变电磁三分量纯异常三维反演方法 [J]. 地球物理学进展, 30(6): 2827–2835.
- 肖昆, 邹长春, 卢振权, 李红星, 秦臻, 葛坤朋. 2020. 基于声波测井的冻土区孔隙型水合物储层水合物饱和度估算方法 [J]. 地质学报, 94(5): 1664–1674.
- 徐新学, 李荣光, 孙磊, 常响广. 2012. 全方位激电测井在老挝华潘铜铁多金属矿勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 36(1): 23–26.
- 许颢砾, 王大庆, 刘志新, 邓正栋, 于景鹏, 丁志斌. 2018. 地面–井下双源瞬变电磁立体探测模拟研究 [J]. 地质与勘探, 54(3): 603–613.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展 [J]. 地球物理学进展, 22(4): 1195–1200.
- 杨毅, 智庆全, 邓晓红, 王丽研, 张杰, 武军杰, 王兴春. 2018. 基于层状大地响应的异常场提取与载流环地–井 TEM 反演技术 [J]. 地球物理学进展, 33(5): 2048–2055.
- 袁峰, 李晓晖, 张明明, 周涛发, 高道明, 洪东良, 刘晓明, 汪启年, 朱将波. 2014. 隐伏矿体三维综合信息成矿预测方法 [J]. 地质学报, 88(4): 630–643.
- 张超, 孔媛政, 袁国霞, 耿祥峰, 万晓磊, 苗德刚. 2019. Voxler 平台在煤矿富水性勘查中的三维可视化应用 [J]. 地质学报, 93(S01): 310–313.
- 张杰, 邓晓红, 郭鑫, 武军杰, 王兴春. 2013. 地–井 TEM 在危机矿山深部找矿中的应用实例 [J]. 物探与化探, 37(1): 30–34.
- 张炯, 李雪松. 2010. 井–地充电法地表电位分布正演数值模拟研究 [J]. 物探深化探计算技术, 32(3): 284–291.
- 张顺林, 汪青松, 朱义坤. 2018. 皖东地区金矿控矿条件与找矿方向 [J]. 安徽地质, 28(1): 17–22.
- 张西君, 蒙应华, 刘俊, 屈念念, 李家斌. 2020. 贵州万人洞金矿电性特征及金矿找矿规律研究 [J]. 中国地质调查, 7(2): 39–44.
- 张晓波, 王成善, 王志辉, 李海龙, 李伟荣, 王强茂. 2019. 广东省潼湖生态智慧区浅层地球物理探测与地层物性分析 [J]. 地质学报, 93(11): 2935–2946.
- 张兆京, 朱明忠. 1995. 深部充电法等井中综合物探方法在新疆找矿中的应用研究 [J]. 矿产与地质, 9(5): 344–347.

Study on the Multiple – Element Exploration Method of Ore Beds in Wells and Gold Exploration Experiment in the Area with Thick Cover—Taken Wuhe Area in Northeast Anhui as An Example

WANG Qingsong^{1,2,3}, ZHANG Jinhui^{1,2,3}, YOU Miao^{1,3}, MAO Sibin^{1,2}, CHAN Siwei^{1,2}

(1. Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031; 2. Key Laboratory of Electrical Exploration of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031; 3. Technology Innovation Center of Coverage Area Deep Resource Exploration Engineering, MNR, Hefei, Anhui 230001)

Abstract: Logging and borehole geophysical methods can be used to divide the formation in the hole, to infer the occurrence of ore bed and the location of blind orebody. They need many times of measurement in the well, not only with low efficiency, but also facing difficulty of probing ore beds in the area with thick cover. To solve this problem, based on the theory of low resistivity and good conductivity of metal ores and charging exploration theory, this study proposes a geological multiple – element observation system with the logging method by one emission and four receivers. By using the high – power electric prospecting system with one emission and multiple receiver function and well – ground joint observation method, it moves continuously and charges in the well, and measures potential synchronously in the four azimuths on the ground. The test shows that this system can accomplish many geological tasks at the same time, such as inferring the occurrence of the ore bed, determining the thickness of the ore bed, finding the leaking ore bed, finding the blind ore body near the well and dividing the strata in the hole. It has high exploration efficiency and good effect, solves the long – standing problem of the occurrence detection of the ore bed in the thick – cover area, and is worthy to be popularized.

Key words: borehole geophysical prospecting, multiple – element exploration, new method test, gold exploration, thick coverage area