

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2025.01.014

三分量测井在狐姑山一带深部隐伏矿体勘查中的应用研究

魏国华, 韩效斌, 王凯飞, 郎学聪, 刘强

(中国冶金地质总局第三地质勘查院, 山西太原 030002)

摘要: 沉积变质型铁矿赋存于太古界变质岩中, 由于地层长期遭受多次构造运动和区域变质作用, 褶皱、断裂等构造发育, 当矿体埋藏较深时, 依据有限的钻孔及地面物探资料分析很难准确的推断矿体的赋存形态。本文通过对狐姑山一带铁矿井中三分量磁测异常的分析研究, 为矿体的圈定及赋存形态的推断提供相应的地球物理依据。

关键词: 井中磁测; 三分量磁测井; 隐伏铁矿体; 矿体赋存形态

中图分类号: P631 **文献标识码:** A

0 引言

随着新一轮找矿突破战略行动的持续深入, 攻深找盲已成当务之急。对于深部矿而言, 其在地面产生的磁异常很弱, 所以地面磁法很难准确推断出矿体的赋存特征; 如果采用电法, 首先价格比较昂贵, 其次电法在老矿区存在诸多干扰, 效果也不理想^[1-3]。要想得到深部的磁性信息, 三分量磁测井是一种非常有效方法, 由于它可以直接进入地下几百米甚至一两千米, 得到数据真实可靠, 结合区域的地质资料、地面物探资料及以往的工作经验, 可以很好地对未知矿体进行判断。

1 研究区地质概况

研究区地处吕梁山中南段。东邻沁水台陷, 北靠桑干台陷的宁武台凹, 西近鄂尔多斯台拗, 按“断块学说”, 本区结晶基底断块构造单元地处五台期断褶带—袁家村—周家沟断褶带。

本区域内出露地层为新太古界吕梁群、古元古

界岚河群、古生界、新生界。

区内地层长期遭受多次构造运动和区域变质作用, 构造形迹复杂, 总体表现为走向 NNW-SE 呈弧形展布的尖山向斜、不完整的狐姑山向斜及狐姑山—尖山背斜, 褶皱轴向 NNW 翘起, 向 SE 倾伏。

区内变质岩分布广泛, 区域出露变质岩为吕梁群袁家村组、裴家庄组及近周营组。吕梁群主要为低绿片岩相—高绿片岩相—低角闪岩相的低压区域变质岩, 次为动力变质作用形成的韧性剪切带动力变质岩。

狐姑山铁矿属于上太古界后期沉积变质铁矿床, 产于吕梁山群袁家村组上部碎屑沉积岩中(袁家村组含铁岩段)。

2 地球物理特征

1976年冶金航测队在该区内完成了1:50000航磁测量, 圈出了多处有意义的磁异常, 区域内自北向南依次排列有C29-4草城一曲井异常, C29-1、C29-2、C29-3袁家村—宁家湾异常, C24、C25寺头—杏湾异常, C23-1、C23-2尖山异常, 形成了一个近SN向展布的规模较大的磁异常带, 航磁异常已

收稿日期: 2024-07-08; 改回日期: 2024-12-10; 责任编辑: 赵庆

作者简介: 魏国华(1983—), 男, 硕士研究生, 工程师。主要从事电法、磁法、地震等地球物理勘察工作。通信地址: 山西省太原市小店区龙城大街107号, 中国冶金地质总局三局科研楼; 邮政编码: 030002; E-mail: 348906056@qq.com

经证实均由磁铁矿引起,袁家村铁矿、狐姑山铁矿、尖山铁矿等大型铁矿就分布在该含矿带上。

通过普查阶段 1:10000 高精度磁法扫面,共圈出 4 处异常。本次研究工作选取其中一处异常为主要对象,本处异常区有一定规模的负值异常区,深部钻孔均已见到厚大的角闪磁铁矿石英岩。

为了解区域各类岩矿层的物性特征,严格进行了岩(矿)标本的采集及测定,其物性测定结果详见表 1、表 2。

从电性参数测试结果可以看出,工作区内钻孔采集到的岩心标本电阻率值普遍较高,与实际地质情况相吻合,整体来看,云母片岩、黑云斜长片麻岩电阻率平均值最大,表现为相对高阻特征,石英片岩、片麻状花岗岩电阻率平均值中等,表现为相对中阻特征,铁矿体电阻率平均值最小,表现为相对低阻特征。

3 三分量磁测井原理

3.1 仪器设备及原理

井中三分量测量使用的仪器为重庆地质仪器厂生产的 JCX-3 型综合数字测井系统,探头型号:JCX-3 型三分量井中磁测探管。系统由测井主机、绞车控制器、绞车、测井探管、笔记本电脑组成^[4,5]。

探头里面有 3 个呈互相垂直关系的磁敏元件,安装在一个可以沿铅垂方向自由摆动和水平方向自由转动的装置上,在重力的作用下,Z 磁敏元件一直垂直向下,感应垂直分量;XY 磁敏元件会随着探管的倾斜方向的变化而整体转动。因此,如果所测井为直孔时,水平转动系统无法确定 XY 的指向,在测井的过程中,它们的指向是无法得知的,因而测得的 XY 值无法进行解析。

测井主机提供井下探管的工作电流,记录和处理测井的深度信号及探管的测量信号,绞车控制器控制绞车做测井探管的下降和提升,笔记本电脑用作测井参数的设置和测井曲线的实时显示及后续的各种曲线处理。

3.2 三分量探管主要技术指标

以重庆地质仪器厂的 JCX-3 型三分量井中磁测探管为例,其主要技术指标如下:

测量范围: -99999 nT~99999 nT

X、Y 磁敏元件转向差 ≤400 nT

Z 磁敏元件转向差 ≤300 nT

倾角测量范围 0~45°,误差 <0.2°

方位角测量范围 0~360°,误差 <2°(倾角 ≥3°)

线性度 ≤2‰

数字输出,更新速度 ≥3 次/秒

探管外形尺寸: Φ40×1400 mm

表 1 磁性参数测定结果

Table 1 Statistics of magnetic parameter measurement results

岩性及 地层划分	块数	磁化率 $\kappa(10^{-6} \times 4\pi \cdot \text{SI})$				磁化率 $\kappa(10^{-6} \times 4\pi \cdot \text{SI})$			
		变化范围		算术	几何	变化范围		算术	几何
		最小	最大	平均值	平均值	最小	最大	平均值	平均值
岩(矿)石名称									
片麻状花岗岩	31	4.6	1675.4	293.7	134.7	20.2	272.5	62.8	50.8
闪长岩	31	7.6	767.8	117.5	73.1	13.7	108.8	53.1	47.6
斜长角闪片岩	33	16.4	2159.1	621.5	442.4	7.5	1250.1	133.5	71.4
云母片岩	32	2.4	805.8	174.9	100.6	10.4	206.3	55.2	43.4
石英片岩	33	21.4	1247.0	285.8	147.8	20.1	207.6	65.5	55.2
铁矿体	32	61010.4	159221.6	91696.9	88306.3	704.0	14354.3	4262.3	2720.5

表 2 电性参数测定结果

Table 2 Statistics of electrical parameter measurement results

岩石名称	块数	极化率(%)		电阻率($\Omega \cdot \text{m}$)		备注
		变化范围	平均值	变化范围	几何平均值	
铁矿体	31	4.97~43.8	21.05	6.94~10905.71	2956.61	一半岩心
石英片岩	20	0.66~17.3	4.48	2150.21~22635.96	7226.68	完整岩心
云母片岩	30	0.41~11.69	3.46	1189.64~36248.66	15597.46	完整岩心
片麻状花岗岩	30	0.78~2.93	1.81	1877.39~15446.82	6011.91	完整岩心
黑云斜长片麻岩	30	0.45~3.3	1.54	3032.41~46930.49	18970.85	完整岩心

测量井深 ≤ 2000 m
 探管耐压 ≤ 150 kg/cm²
 配用电缆:4芯铠装电缆
 工作环境:温度 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$;湿度 45% (40°C)

4 三分量磁测井数据采集及处理

4.1 仪器校验

测井前,首先对仪器的性能及转向差进行测定;对绞车进行零点及其参量设置;对电缆及仪器间连线的对地绝缘电阻进行测定。在各种仪器性能均正常、完好的情况下方可进行测井工作。本次研究区根据野外钻探工程施工的实际情况,分别于2020年6月、2020年9月、2020年12月、2021年6月进行了4次仪器转向差的校验,测定结果详见表3。

由此可见,磁力仪稳定性 ΔZ 平均 81.25 nT, ΔH 平均 78.75 nT。 X 、 Y 磁敏元件转向差 ≤ 400 nT, Z 磁敏元件转向差 ≤ 300 nT的总体要求,仪器性能良好。

4.2 数据收集整理

需要收集整理的资料有:钻孔位置的地磁参与场(IGRF),地磁场水平分量 H_0 ,垂直分量 Z_0 ,磁偏角 D ;钻孔的测斜资料,包括深度、顶角(倾角)、方位角;地质剖面方位角;三分量磁测井数据(深度、XYZ三个分量值)。

4.3 数据处理方法

剩余垂直分量 ΔZ :只需用测得的数值减去 Z_0 ($\Delta Z = Z - Z_0$)

水平分量的处理:能够得到3个参量: ΔZ_{\perp} (剩余水平分量在地质剖面的投影)、 ΔZ_{\parallel} (剩余水平分量在地质剖面的垂直剖面的投影)。计算见图1,可

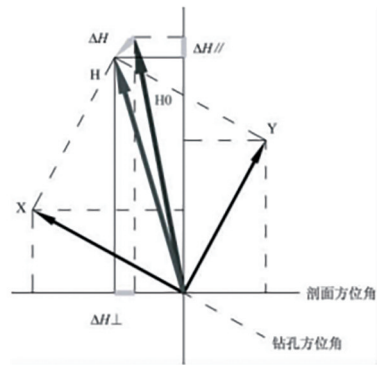


图1 用矢量合成分解法求解水平分量

Fig. 1 Solving horizontal components using vector synthesis decomposition method

以用矢量的合成分解法。

具体实现方法:根据钻孔方位角和地质剖面方位角的相对关系,把 XY 分量投影到地质剖面(H_{\perp})及其垂直剖面(H_{\parallel})上,再把水平分量 H_0 投影到上述2个剖面上($H_{0\perp}$ 、 $H_{0\parallel}$),然后用前面的两个数值分别减去后面的2个数值,就得到了 ΔH_{\perp} 和 ΔH_{\parallel} 。

4.4 数据成图

在得到每个测点的 ΔZ 、 ΔH_{\perp} 和 ΔH_{\parallel} 后,就可以绘制曲线和矢量线, ΔZ 曲线、 ΔH_{\perp} 曲线、 ΔZ_{\perp} 矢量线及 ΔZ_{\parallel} 矢量线。

曲线的绘制相对比较简单,下面重点介绍一下矢量线的绘制方法。

ΔT_{\perp} 矢量及 ΔT_{\parallel} 矢量:它们相当于测得的磁场矢量和理论地磁场矢量相减后得的剩余磁场矢量在地质剖面及其垂直剖面的投影。它们的垂直分量都是 ΔZ ,水平分量分别是 ΔH_{\parallel} 及 $\Delta H'$,知道了这些就可以直接利用上面计算出来的数值来做图了^[4.6-7]。

表3 井中三分量磁测磁力仪转向差测定统计

Table 3 Statistics of the steering deviation of magnetometer for three component magnetic survey in drill holes

日期	转向差(nT)		稳定性(nT)		
	ΔZ	ΔH	ΔX	ΔY	ΔZ
2020.6.10	64	58	20	49	11
2020.9.21	60	55	12	45	5
2020.12.22	70	65	11	34	22
2021.06.22	131	137	107	156	115
平均	81.25	78.75	37.5	71	38.25

5 井中三分量磁测曲线特征

受区域构造活动影响,研究区内沉积变质型铁矿矿体产状多为近 NW 走向,向东倾的特征。在本次勘查工作中,07 号勘探线布置为近 EW 向,结合区内几处大型铁矿的三分量磁测井资料,主要有以下几种异常曲线:

(1) 矿体内异常曲线特征

在见矿部位(图 2), ΔZ 一般为 $-10000 \sim -40000$ nT,钻孔上部平缓无明显波动,1088 m~1146 m 为磁异常段,该段在垂直分量和水平分量上均呈现尖锐状,曲线的变化与矿体的分布相吻合。如图 1,曲线锯齿形变化反映矿体磁性不均匀或矿

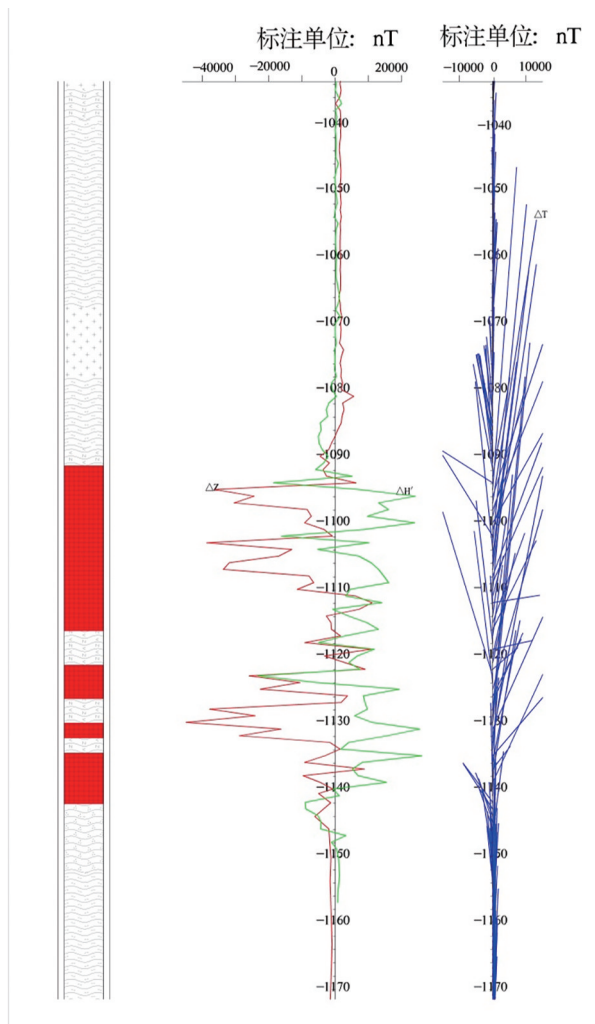


图 2 狐姑山一带 ZK0705 钻孔三分量测井曲线图

Fig. 2 Three component logging curve diagram of drill hole ZK0705 in the Hugushan area

体的多层状产出。

当矿体在钻孔周围延伸较大,并且呈现出近似顺层磁化,周围旁侧矿体影响很小时,钻孔中在矿体的上下盘 ΔZ 将出现突变,而后快速减弱,这种曲线主要是矿体板面所引起。

从 1146 m 往下垂直分量曲线形态趋于平缓(图 2),回到背景场值,水平分量曲线形态也较为平缓,结合钻孔地质资料综合分析认为该孔孔底无明显磁异常,整体曲线无旁侧异常,建议终孔。

(2) 旁侧异常曲线特征

钻孔上部平缓无明显波动,896~936 m 段曲线形态为反“S”状(图 3),该段在 ΔZ 和 ΔH 异常曲线变化较大,极值为 52962 nT,孔内对应为辉绿玢岩,岩石具弱磁性,推断钻孔周围存在旁侧异常。建议在该钻孔周围布置新钻孔验证此处的旁侧异常。

孔深 964~971 m 段及其附近 ΔZ 和 ΔH 异常曲线呈锯齿状剧烈跳跃,跳跃幅度相对较大, ΔZ 和 ΔH 均呈现较明显的强磁性地质体内磁场特征,孔内对应为磁铁石英岩,岩石具强磁性,推断异常为磁铁铁矿引起。

从 971 m 往下至 1055.6 m 垂直分量曲线形态趋于平缓,回到背景场值,水平分量曲线形态也较为平缓,整体曲线无旁侧异常显示,钻孔下部岩芯也为穿出矿层的底板岩性,因此推断该孔孔底无盲矿体。建议终孔。

6 应用实例

2012 年至今,中国冶金地质总局第三地质勘查院陆续组织实施了山西省娄烦县狐姑山矿区深部及外围铁矿普查项目、普查续作及其详查阶段的项目。通过各项工作综合分析认为狐姑山铁矿深部找矿潜力巨大,但对于深部矿体的赋存形态需要借助钻探、地面物探及三分量磁测井资料,经过综合分析验证,才能加以把握,进而指导下一步的工作。

从 ZK0706 钻孔见矿及三分量测井曲线对照图(图 4)可见,钻孔上部平缓无明显波动,1136 m~1205 m 为磁异常段,该段在垂直分量和水平分量上均呈现锯齿状,跳跃极值达 -35000 nT,异常是由对应该段地质岩芯磁铁石英岩引起,从 1210 m 往下至 1217 m 垂直分量曲线形态趋于平缓,回到背景场值,水平分量曲线形态也较为平缓,结合钻孔地质资料综合分析认为该孔孔底无盲矿体,整体曲线

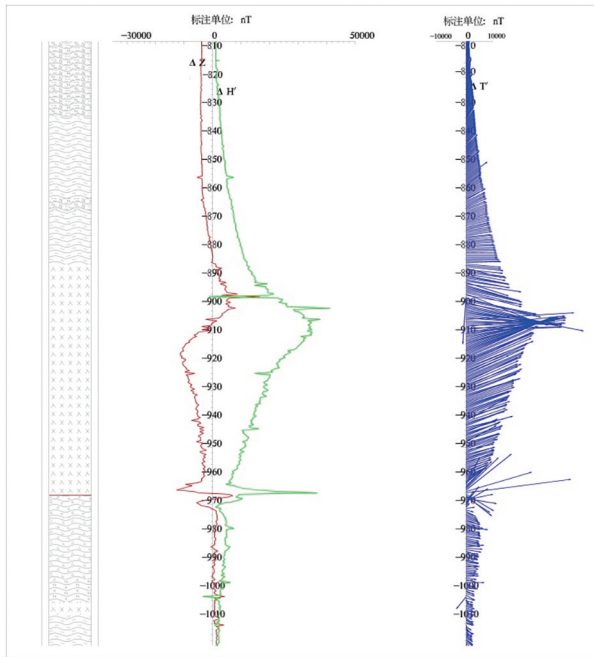


图3 狐姑山一带 ZK2809 钻孔三分量测井曲线图

Fig. 3 The diagram of three component logging curve of drill hole ZK2809 in the Hugushan area

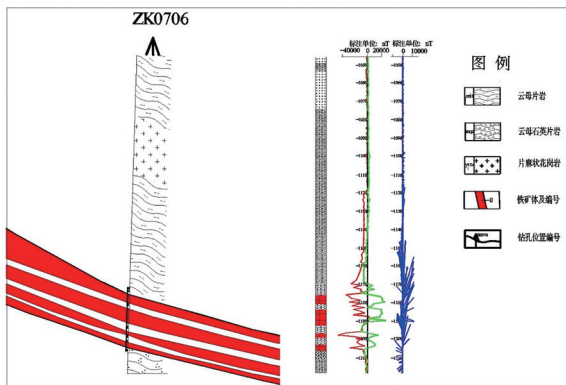


图4 狐姑山一带 ZK0706 钻孔见矿及三分量测井曲线对照图

Fig. 4 Correlation diagram of three component logging curve of drill hole ZK0706 and drilling hit iron ore in the Hugushan area

并无旁侧异常显示。

ΔZ 曲线以负值为主,上下异常微弱,磁异常段在垂直分量和水平分量上均呈现锯齿状,负峰值大致对应矿体的端部。本次 07 号勘探线方向近于东西向,结合地面物探资料,07 号勘探线不应有断裂构造存在,从地质角度进一步验证了三分量磁测井的推断成果。

通过本次研究工作,取得了如下主要成果:

(1)依据正演结果,磁正异常位于矿体下延逆方向,磁负异常位于矿体下延方向,且磁负异常幅度减小,负异常宽度继续增加,说明矿体在深部继续延深,产状变缓。磁性体的下延深度对异常特征的影响,实质上就是底面磁荷(磁极)产生的负异常对总磁场的影响。有限延深磁性体的异常特征表现为正异常周围出现负值;无限延深磁体一般只在正异常的一侧出现负值;只有既是无限延深又是顺层磁化的磁性体,其异常才不出现负值。

(2)磁化率反演推测花岗岩体,浅部产状较陡,厚度较大。磁化率正演模型显示磁异常的幅度较小,宽度较大。随着异常宽度的增加,异常幅度趋近 0 nT。花岗岩体磁异常的幅度远小于磁铁矿磁异常的幅度。

7 结语

井中三分量磁测是把测井探头通过绞车送入地下钻孔深部接近目标体,进而发现纵向矿体的存在及其矿体形态特征,这是地面磁测的不足之处。其中未能揭露矿体的钻孔,可以通过井中三分量磁测了解钻孔侧壁和底部一定范围内是否有矿体存在,如发现有隐伏矿体存在,还可以推测矿体的空间位置。因此,井中磁测工作在磁铁矿勘查中必不可少,特别是未见矿的钻孔必须进行井中磁测工作,通过分析未见矿原因,来指导下一步钻孔布置工作,达到节约钻探工作量的目的。

参考文献:

[1] 周耀质,刘敏,李辉.三分量磁测井在鄂东南地区盲矿勘查中的应用[J].资源环境与工程,2023,37(2):201-207+243.

[2] 冯景志,刘玉翠,施凯威.三分量磁测井在深部隐伏磁铁矿体形态推断中的应用研究[C]//中国地球物理学会.首届全国矿产勘查大会论文集,2021:6.

[3] 王年喜.三分量磁测井在找矿勘探中的应用[J].山西建筑,2017,43(3):67-68.

[4] 刘蒙恩,顾卫.浅谈三分量磁测井的原理及应用[J].地质装备,2014,15(2):22-25+19.

[5] 邵梦林,李学圣.利用三分量磁测井资料计算钻孔磁方位角[J].地质与勘探,1972(3):22.

[6] 王永国,汪钟莲,李暖,等.井中三分量磁测在青海尕斯库勒多金属矿的应用[J].地质与资源,2016,25(1):92-96.

[7] 徐春华,秦新龙,崔健,等.钻孔测井资料在深部找矿预测中的

应用——以福建梅仙镇峰岩—谢坑矿区找矿应用为例[J]. 物探与化探, 2018, 42(5): 873 - 881. [8] 吴鲁沂. 小口径五分量磁测井仪和井斜计算公式[J]. 地质与勘探, 1978(8): 36 - 39.

Research on the Application of Three Component Logging to the Deeply Hidden Ore Bodies Exploration in Hugushan Area

WEI Guohua, HAN Xiaobin, WANG Kaifei, LANG Xuecong, LIU Qiang

(The Third Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Taiyuan 030002, Shanxi province, China)

Abstract: Sedimentary metamorphic iron deposits occur in Archean metamorphic rock strata. Due to multiple tectonic movements and regional metamorphism are developed folds, fractures, and other structures in the strata. When the ore body is deeply buried accurate inference of the morphological occurrence of the ore bodies is difficult based on limited drilling and ground geophysical data analysis. In this article three component magnetic anomalies in Hugushan iron mine are analyzed and studied to provide geophysical basis for the delineation of ore bodies and inference of their morphological occurrence

Key Words: drill hole magnetic survey; three component logging; hidden iron ore body; ore body morphology