

高密度电阻率法和音频大地电磁法在齐大山铁矿伴生铌钽矿探测中的应用研究

杜鑫¹, 贾三石^{2*}, 傅国辉³, 孙铭阳², 褚会超¹, 杨晓峰¹

1. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200;
2. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;
3. 鞍钢集团矿业有限公司, 辽宁 鞍山 114043



摘要:为解决鞍本地区露天铁矿内发现的新类型伴生战略性金属矿产资源潜力评价技术难题,以齐大山铁矿伴生铌钽矿作为研究对象,结合伴生铌钽矿赋存空间内的岩(矿)石地质—地球物理识别特征,采用小极距、多电极的高密度电阻率法和中—高频信号的音频大地电磁法进行联合探测研究。结果表明,高密度电阻率法和音频大地电磁法可以准确圈定齐大山铁矿体内伴生铌钽矿的云英岩化蚀变岩形态特征和规模大小,其厚度为40~60 m,延深超过150 m,资源潜力巨大。此外,高密度电阻率法和音频大地电磁法还可以精细探测磁铁富矿的赋存地质结构和岩(矿)体边界,为后期安全高效的采矿优化设计提供数据支撑。

关键词:齐大山铁矿;伴生铌钽矿;高密度电阻率法;音频大地电磁法;云英岩化

中图分类号: P631.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)06-1073-11 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.163
引用格式: 杜鑫, 贾三石, 傅国辉, 等. 高密度电阻率法和音频大地电磁法在齐大山铁矿伴生铌钽矿探测中的应用研究[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(6): 1073-1083. DU Xin, JIA Sanshi, FU Guohui, et al. Application of High-density Resistivity Method and Audio-frequency Magnetotelluric Method in the Detection of Associated Nb-Ta Ores in the Qidashan Iron Mine[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(6): 1073-1083.

铌钽矿作为一种战略性金属矿产资源,在航空航天、医疗和核能工业等高科技领域发挥着不可替代的作用(邓攀等,2019)。我国铌钽矿资源总体上比较丰富,储量可观,在全球占据着重要地位(李建康等,2019)。然而,随着相关高科技领域的快速发展,我国对铌钽矿资源的需求快速增长,加之我国铌钽矿资源因具有嵌布粒度细、成分复杂、分布零散和品位低等特点,开采和冶炼难度大、成本高(陈振宇等,2023),从而造成国内铌钽矿资源的产量远远不能满足自身需求,每年需要大量进口,导致对外依存度高。面对此种情况,为防患于未然,除加强现有铌钽矿的工艺矿物学研究以提高选冶技术

水平外,寻找新类型铌钽矿资源也是保障铌钽矿供应安全的重要途径。值得一提的是,研究人员首次在华北克拉通鞍山式铁矿中发现一种新类型的蚀变岩型铌钽矿与富铁矿相伴产出(李立兴等,2022),可作为铁矿资源开采的副产品进行开发利用。上述蚀变岩型铌钽矿具有较好的工艺矿物学特征,适宜采用传统的选冶技术,可以大幅降低采选冶技术成本,亟需加快该类型伴生铌钽矿资源的开发利用进程。然而,作为赋存于铁矿采区的新类型伴生铌钽矿,其产出形态特征和规模大小尚未明确,导致难以开展有效的资源潜力评价,从而制约了对该类型伴生铌钽矿资源的大规模开发利用。

收稿日期: 2025-05-13; 修订日期: 2025-07-03

基金项目: 国家重点研发计划项目“辽东前寒武纪蚀变岩型铌钽矿形成机理与快速探测技术”(编号: 2022YFC2905400)资助

作者简介: 杜鑫(1994—),男,山西长治人,工程师,从事矿山资源综合利用研究工作。E-mail: dxcumtb@163.com

*通信作者: 贾三石(1982—),男,河南舞阳人,副教授,从事金属矿床成矿规律与成矿预测研究工作。E-mail: jss_193@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

关于铁矿中伴生钨钼矿资源的潜力评价,目前研究涉及较少且缺乏行之有效的技术评价方法,一般多采用基础地质调查方法进行评价,存在周期长和费用高的问题。尤其是对于正在开采利用的铁矿,在不影响安全生产的前提下,目前仍缺乏针对伴生矿的快速评价研究成果。与此同时,地球物理探测技术方法作为一种无损高效的探测技术手段,多用于不同赋存深度金属矿的快速探测评价(Christiansen et al, 2018; 何继善, 2019; Kwan et al, 2020)。其中,电阻率法可用于对金属矿体浅部产出地质特征的精细探测(Ishizu et al, 2019; 牛聪聪等, 2021; 景国庆等, 2022);音频大地电磁法则可用于对中—深部地质体的定位探测(俞炳等, 2021; 孙浩等, 2022; 刘永亮等, 2024)。但对于伴生钨钼矿的具体地球物理探测技术方法,目前仅有少量研究,且多集中于对单独产出钨钼矿间接地质找矿标志的地球物理异常识别(吴义布等, 2023; 余君鹏, 2024)。综上所述,目前迫切需要研发一种便捷高

效的综合地球物理探测技术方法来评价铁矿中潜在的伴生钨钼矿资源,从而支撑铁矿的开采优化设计,以实现铁矿资源与伴生钨钼矿资源的协同开发利用,并大幅降低采选成本。

鉴于此,本文以华北克拉通东段的齐大山铁矿伴生钨钼矿作为研究对象,基于伴生钨钼矿有关岩(矿)石物性参数测定成果,采用高密度电阻率法和音频大地电磁法联合对其浅—中—深部产出地质特征进行精细探测研究,以解决生产铁矿山中伴生钨钼矿资源潜力快速评价技术难题,从而加快对新类型伴生钨钼矿资源的开发利用进程。

1 地质—地球物理特征

1.1 成矿地质特征

齐大山铁矿位于华北克拉通东北缘鞍山—本溪地区的铁矿集中区内,是该区的特大型铁矿床之一(图1)。区内出露地层主要有太古宇鞍山群、元

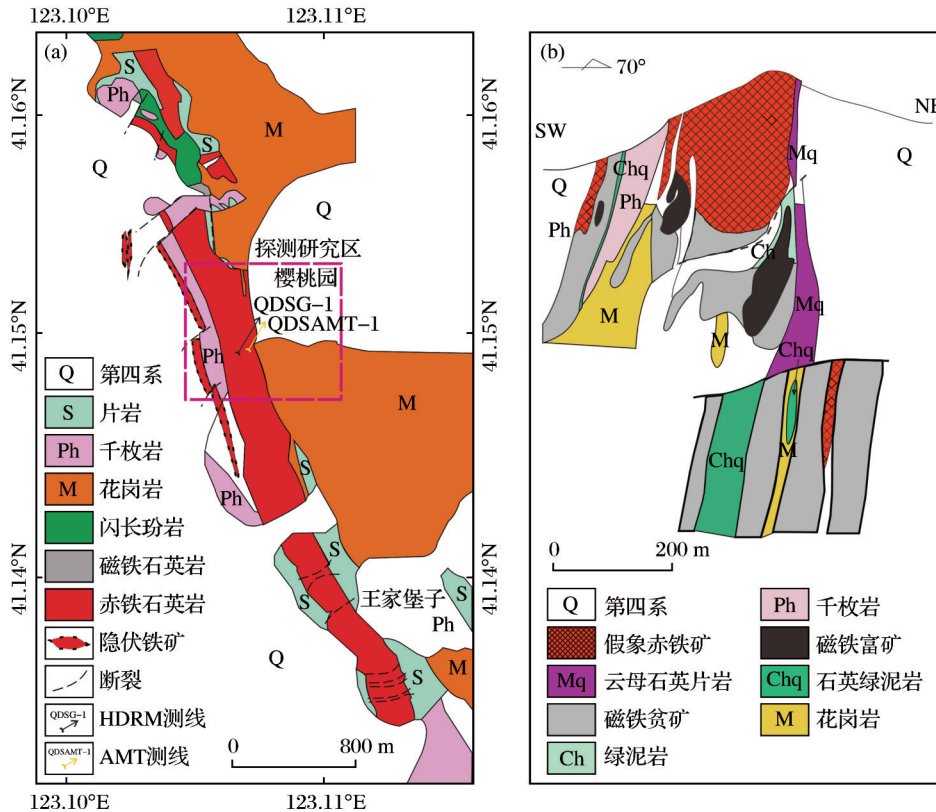


图1 齐大山铁矿地质简图(a)和富铁矿体地质剖面图(b)(修改自周世泰, 1994)

Fig. 1 Geological sketch map (a) and geological profile of iron-rich orebody of the Qidashan iron mine (b) (modified after Zhou, 1994)

古宇辽河群和第四系。其中,鞍山群发育条带状硅铁建造,并分布有大量的沉积变质型铁矿床,规模较大的有齐大山、胡家庙子和大台沟等;鞍山群为一套以黏土质、半黏土质岩和硅铁质沉积岩为主,并含有少量中基性变质火山岩的原岩组合。辽河群不整合覆盖在鞍山群之上,其产状与鞍山群基本一致,由底部砾岩、石英岩和千枚岩组成(蒙嘉琪等,2024)。区内断裂发育,主要有NNW、NEE和EW向横断裂。NNW向断裂主要出露在齐大山铁矿体的上下盘,产状与铁矿层大致相同。NEE向横断裂在本区较发育,走向一般为NEE向,倾向S,倾角为 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。区内岩浆岩主要有齐大山铁矿西部最古老的铁架山花岗岩和东部的弓长岭花岗岩(又称齐大山花岗岩)。除此之外,齐大山铁矿区内还可见闪长岩、闪长玢岩和辉绿岩等脉岩出露。

齐大山铁矿赋存于新太古界鞍山群樱桃园组内,属于典型的BIF型铁矿,又称为“鞍山式”铁矿。鞍山群樱桃园组岩性主要为绢云石英绿泥片岩、云母石英岩和绿泥石岩等[图1(a)],变质程度为绿片岩相。齐大山铁矿主体为贫铁矿层,矿体走向NNW,倾向SW,倾角为 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$,长度约为5 km,厚度为170~250 m,其中磁铁矿贫矿石平均品位为TFe 31.79%。值得一提的是,齐大山铁矿的近地表铁矿体已被氧化,以赤铁矿为主,深部则以原生的磁铁矿为主[图1(b)]。

1.2 地质—地球物理识别特征

齐大山铁矿新发现的伴生铌钽矿,是一种现场

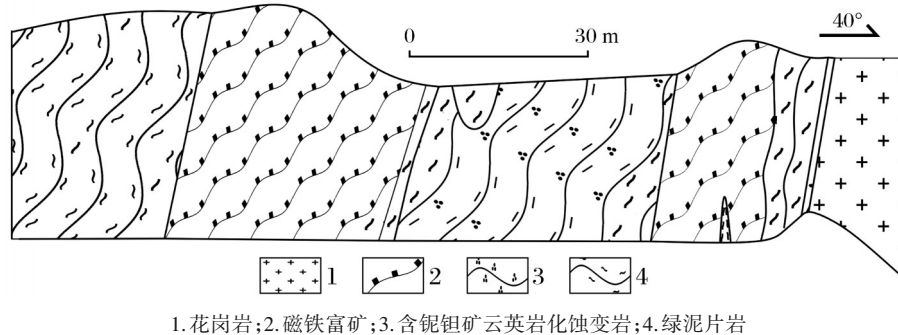
易于识别的含铌钽矿云英岩化蚀变岩,在采场地表出露较多,且与区内铁矿及有关的绿泥片岩界限清楚(图2)。矿体呈灰白色,以白云母和石英为主,金属矿物以少量的铌铁矿和钽铁矿为主,颜色较浅。铌钽矿明显受区内富铁矿体空间分布的控制,并被不规则的富铁矿体所包裹。富铁矿体产于绿泥片岩旁或呈不规则体赋存于绿泥片岩内,绿泥片岩的外围则是花岗岩体,具体空间分布特征如图2所示,表现出明显的蚀变矿化分带特征,即由内到外分别是含铌钽矿的云英岩化蚀变岩、绿泥片岩、磁铁富矿、绿泥片岩和花岗岩(图3)。目前,从地表揭露情况来看,铌钽矿体整体受NNW和NEE向断裂的联合控制,走向NW,其地表出露长度超过100 m,宽度变化较大,平均可达数十米,目前对于其延深尚无工程控制。除此之外,通过对含铌钽矿云英岩化蚀变岩的采样化验分析表明,区内伴生铌钽矿平均品位达 $0.01605\%[(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_5]$ 。

通过分析含铌钽矿云英岩化蚀变岩的赋存地质空间特征,探测研究区内的岩(矿)石类型较为简单,主要由磁铁富矿石、绿泥片岩、云英岩化蚀变岩和花岗岩等组成。此外,由于探测研究区位于露天采场的坑底采矿平台,处在地下水位线以下,存在较大的水压差,属于露天采场的汇水区,导致其内岩(矿)石因相对富水而具有相对较低的电阻率特征。



图2 齐大山铁矿伴生铌钽矿体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the associated Nb-Ta orebody in the Qidashan iron mine



1.花岗岩;2.磁铁富矿;3.含铌钽矿云英岩化蚀变岩;4.绿泥片岩

图3 含铌钽矿云英岩化蚀变岩地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of greisenized altered rock containing Nb-Ta ore

为了获得探测研究区岩(矿)石的真实电阻率参数特征,采用对称小四极法在露天采场进行岩(矿)石原位电阻率物性参数测定(表1)。经过系统的测试分析可知,探测研究区内花岗岩电阻率最高,整体在 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上;富铁矿石电阻率最低,整体在 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 以下;绿泥片岩相较于云英岩化蚀变岩更为破碎,含水量高,电阻率主要分布在 $200\sim 400\ \Omega\cdot\text{m}$;云英岩化蚀变岩富含石英,其电阻率主要分布在 $400\sim 800\ \Omega\cdot\text{m}$ (表1)。由电阻率物性参数测试结果可知,这些岩(矿)石之间存在明显的物性参数差异,具备应用电法进行探测评价研究的理论基础。为了提高地球物理探测方法的精度、空间分辨率和准确度,本研究采用多电极、小极距的高密度电阻率法和中—高频率的音频大地电磁法联合进行数据采集和分析处理工作。

表1 齐大山铁矿伴生铌钽矿典型岩(矿)石物性参数
Table 1 Physical parameters of typical rocks and ores with associated Nb-Ta mineralization in the Qidashan iron deposit

岩(矿)石类型	测试样品数量	电阻率 $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	
		变化范围	平均值
花岗岩	37	720~3 150	1 873
磁铁富矿	45	52~338	177
绿泥片岩	39	162~589	356
云英岩化蚀变岩	35	406~810	630

2 地球物理探测技术方法

2.1 高密度电阻率法

传统的电阻率法通常采用对称四极装置(图4)(刘天佑,2007),并根据式(1)进行电阻率计算(李

金铭,2015)。高密度电阻率法(HDRM)是在传统电阻率法的基础上发展起来的一种电性勘探方法,属于将电剖面法与电测深法相结合的一种高效的地球物理探测技术方法。高密度电阻率法可以一次性布设大量的测量电极(图5),实现多电极组合测量,从而获得非常丰富的地下电性结构信息,达到给地质体进行“CT扫描”的效果,多用于划分地层精细结构,识别岩(矿)体、构造、岩溶洞穴和滑坡等地质体(罗登贵等,2014;朱紫祥等,2017;韩鹏,2020)。但在实际测量过程中,由于受到地质地形等条件的限制,电阻率法测得的电阻率并不是某一岩层的真实电阻率值,而是与探测区内各种岩(矿)体电阻率都有关的一个量,称为视电阻率值,其表达式为

$$\rho_s = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{\Delta U_{MN}}{I} = K \frac{\Delta U_{MN}}{I} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为视电阻率; K 为装置系数; ΔU_{MN} 为测量电极 MN 间的电位差; I 为供电回路的电流强度。

高密度电阻率法主要采用重庆顶峰公司研制的级联式布线的EDJD-3高密度电法测量系统,测线依据场地实际情况布设12~180道,电极点距为2~5 m,可采用温纳和偶极等多种测量装置。测量参数设置:循环观测和重复观测次数均为2次,供电电压为400~700 V,每点测量时间为1~2 s,测量模式为视电阻率。测量完成后,对数据进行处理。首先,对采集到的高密度电阻率法数据进行数据转换,并转存到计算机上。然后,采用骄佳技术公司研制的电法软件Geogiga Rimgager进行预处理,以消除各种干扰因素造成的电法数据畸变,并构建模型

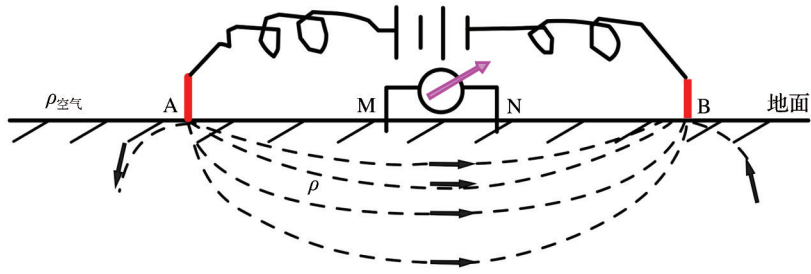


图4 电阻率法的对称四极装置

Fig. 4 Symmetrical four-pole device of resistivity method

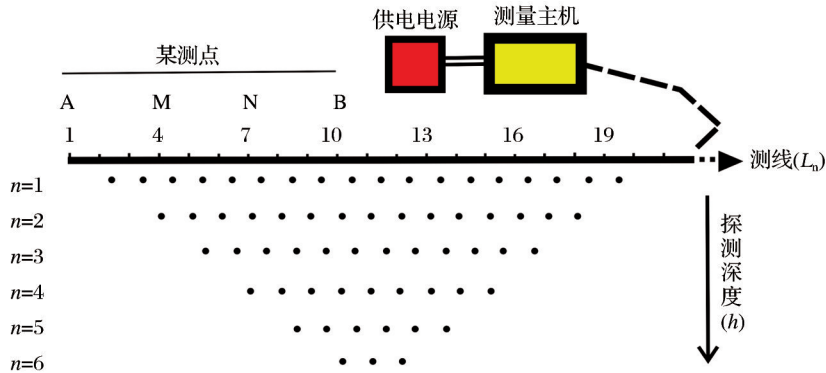


图5 高密度电阻率法探测装置

Fig. 5 High-density resistivity method detection device

进行实测电阻率法数据的正反演计算和分析,获取可靠的电阻率反演数据。最后,将高密度电阻率法反演数据绘制成电阻率等值线断面图,供探测研究区进一步的地质—地球物理解译使用。

2.2 音频大地电磁法

音频大地电磁法(AMT)是通过在地表观测天然音频电磁场来研究地下岩层的电学性质及其分布特征的一种地球物理探测方法。该方法采用美国EMI和Geometrics公司联合研制的EH4设备,可以解决浅、中深部空间范围内的隐伏地质体探测问题(Zeng et al, 2020)。EH4是一种双源型电磁系统,工作频率范围为10 Hz~100 kHz。具体工作时,EH4采集相应频率(f)的天然场或人工源电场(E ,一组正交的 E_x 和 E_y 分量)信号和磁场信号(H ,一组正交的 H_x 和 H_y 分量),通过式(2)计算出相应频率所对应的电阻率 ρ ,由此根据频率与深度之间的关系,达到测量地下多层电阻率的目的。值得一提的是,EH4可以连续单点测量,可灵活应用于各种不利地形和地貌探测环境中。

$$\rho = \frac{1}{5f} \left| \frac{E}{H} \right|^2 \quad (2)$$

EH4设备具体的数据采集方法如下:依照流程开展测网敷设、仪器检查、电极布置、磁棒布置、AFE(前置放大器)布置和主机布置,然后进行数据采集(图6)。本次研究中,音频大地电磁法测量地点位于齐大山露天铁矿-225 m标高的采矿平台上,测线沿NNE向布设[图1(a)],测量点距为20 m,测量时间选在上午9点至12点,每个测点采集时间为15~20 min。对于EH4采集到的时间序列数据,先进行数据预处理,然后进行FFT变换,获得电场和磁场虚实分量和相位数据,并利用设备自带的软件进行一维反演和二维联合反演。最后,将数据处理结果绘制成二维电阻率剖面图进行地质—地球物理解译。

3 综合地球物理探测方法应用

3.1 探测研究区现状与数据采集处理

齐大山铁矿伴生铌钽矿探测研究区位于齐大

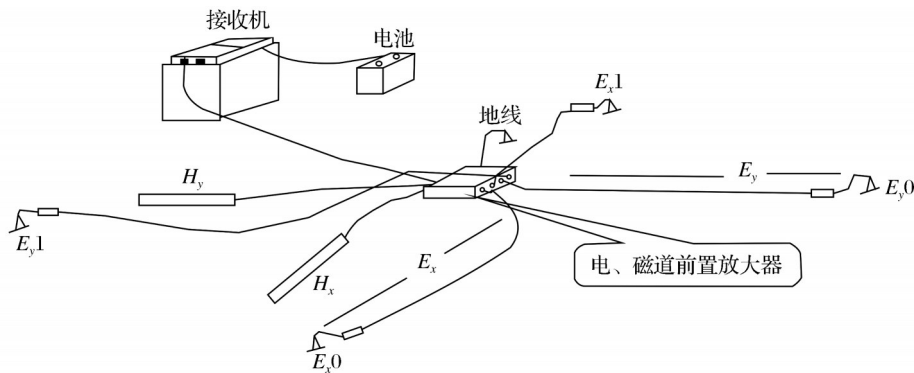


图6 音频大地电磁法探测装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of detection devices for audio-frequency magnetotelluric method

注: E_x0 、 E_x1 为 X 电极; E_y0 、 E_y1 为 Y 电极; H_x 为 X 磁棒; H_y 为 Y 磁棒; E_x 为 X 电极距; E_y 为 Y 电极距

山铁矿露天采场-225 m 标高的采矿平台。该探测研究区所在的露天采场呈近 SN 向展布, 长度超过 3 300 m, 宽度达 1 100 m。伴生铌钽矿由于受 NEE 向横断层和 NNW 走向断层的联合控制而呈 NW 向分布。露天采场内出露有云英岩化蚀变岩带, 并在其内发育有厚度不明和延深不清的铌钽矿化体。除此之外, 由于露天采场安全生产的需要, 每个采矿平台剥岩后, 需要及时在采场地面上覆盖数米厚的碎石层, 这也导致传统地质调查方法难以对采场出露的云英岩化蚀变岩带进行有效评价。因此, 依据齐大山铁矿露天采场现场探测条件, 首先采用沿 NNE 向布设的高密度电阻率法测线探测采场内浅部云英岩化蚀变岩带的形态特征和规模大小, 然后依据高密度电阻率法探测结果布设音频大地电磁法测线, 二者联合探测, 并相互验证, 最终得到齐大山铁矿伴生铌钽矿的空间分布特征。

齐大山铁矿伴生铌钽矿的高密度电阻率法探测数据采集与处理, 主要围绕 QDSG-1 测线展开。上述测线穿越了地表出露的富铁矿带、绿泥片岩带和云英岩化蚀变岩带, 可使探测成果与浅部出露的地质特征相互比对验证[图 1(a) 和图 3]。测线 QDSG-1 共布设了 108 个电极, 电极点距为 2 m, 测线总长度达 214 m, 最大有效探测深度达 70 m。测线 QDSG-1 共采集一定深度空间内的视电阻率数据 1 890 个, 并采用骄佳电法处理软件进行系统处理, 其间保证电阻率反演模型的拟合误差分析符合要求, 即 RMS 值小于 10%。最后, 将反演结果绘制成电阻率等值线断面图, 供进一步地质—地球物理

解释推断。

根据现场实际可布设条件, 齐大山铁矿伴生铌钽矿的音频大地电磁法测线 QDSAMT-1 平行于高密度电阻率法测线布设[图 1(a)], 其起点为测线 QDSG-1 的 40 m 处, 终点与电阻率法测线基本一致, 点距为 20 m。为了提高探测精度和空间分辨率, 音频大地电磁法采用中—高频率信号采集, 探测深度可达数十米至数百米。测线 QDSAMT-1 共采集 10 个测深点数据, 并利用设备自带软件进行系统处理, 保证电阻率反演模型的拟合误差分析符合探测技术要求, 即 RMS 值小于 10%。最后, 绘制了 AMT 测线的二维电阻率剖面图并进行地质—地球物理解释推断。

3.2 地球物理联合探测结果

齐大山铁矿伴生铌钽矿区域的高密度电阻率法测线 QDSG-1 探测成果如图 7 所示, 呈现出明显的高电阻率和低电阻率异常圈闭区相伴产出特征, 主要是由不同地质体的电性差异引起。根据含铌钽矿云英岩化蚀变岩的典型地质剖面图和岩(矿)石物性参数识别特征(图 3), 加之该测线位于正在剥离的采矿平台, 不断有牙轮钻打出符合地球物理解译成果的岩(矿)石碎末, 相当于浅部的地质钻探验证, 共同保证了本次地质—地球物理解译工作的可信度。

由图 7 可知, 整体上, QDSG-1 测线地表下方 0~3 m 深度范围内出现以薄条带状高电阻率值异常水平分布为主的异常区, 推测主要是由区内露天采场地表覆盖的碎石基底导致, 而局部的低电阻率异常

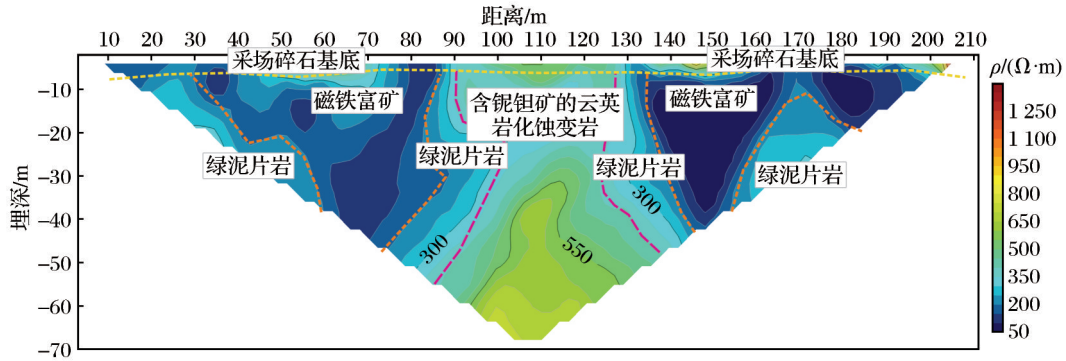


图7 齐大山铁矿伴生铌钽矿的QDSG-1剖面高密度电阻率法成果图

Fig. 7 High-density resistivity method results map of QDSG-1 profile for associated Nb-Ta ore in the Qidashan iron mine

则可能主要由其下方存在的低电阻率磁铁富矿所致。QDSG-1测线30~85 m和135~195 m处的下方均出现明显的低电阻率异常圈闭区,形状呈不规则的脉状和透镜体状产出,其电阻率值整体在200 Ω·m以下。基于采场地表地质体出露情况和有关的岩(矿)石物性参数识别特征,推断它们是磁铁富矿体存在引起的低电阻率异常圈闭区。值得一提的是,在QDSG-1测线90~130 m下方出现了明显的相对高电阻率异常圈闭区,该异常圈闭区稳定向下延深,结合采场地表出露的含铌钽矿云英岩化蚀变岩体和有关岩(矿)石物性参数识别特征,推测为含铌钽矿云英岩化蚀变岩导致的异常圈闭区。该异常圈闭区稳定向深部延伸,最厚处可达60 m以上,延深在70 m以上。而位于磁铁富矿体与云英岩化蚀变岩过渡区的电阻率异常,可依据已有岩(矿)石的地质—地球物理识别特征推断为磁铁富矿体的赋矿围岩——绿泥片岩。除此之外,上述含铌钽矿的云英岩化蚀变岩、磁铁富矿和绿泥片岩之间存在明显的电阻率异常梯度带,主要由它们之间存在的过渡边界引起,也进一步说明可以采用电阻率梯级变化带确定不同岩(矿)体的深部边界分布变化特征。

齐大山铁矿伴生铌钽矿的音频大地电磁法测线QDSAMT-1探测结果如图8所示,显示出有规律的电阻率异常圈闭区。由于测线QDSAMT-1与QDSG-1平行,且从QDSG-1测线的40 m处开始,因此二者浅部异常可以相互对比与验证。与高密度电阻率法测线QDSG-1探测结果一致,音频大地电磁法测线QDSAMT-1在浅部(埋深为0~70 m)也出现了由绿泥片岩、磁铁富矿和含铌钽矿云英岩化

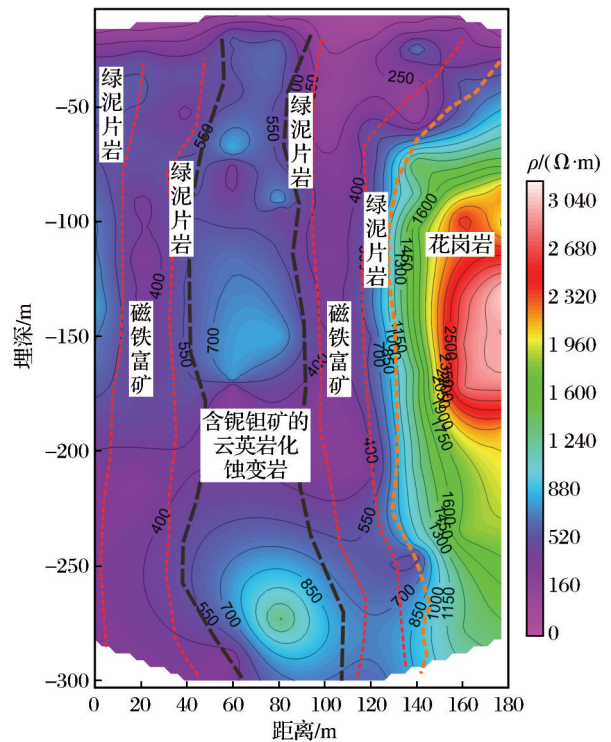


图8 齐大山铁矿伴生铌钽矿的QDSAMT-1剖面音频大地电磁法成果图

Fig. 8 Audio-frequency magnetotelluric method results map of QDSAMT-1 profile for associated Nb-Ta ore in the Qidashan iron mine

蚀变岩引起的电阻率异常圈闭区。当埋深大于70 m时,含铌钽矿云英岩化蚀变岩和磁铁富矿也稳定向下延深150 m以上。除此之外,测线QDSAMT-1在长度120 m以后,埋深在50 m以上出现了明显的高电阻率异常圈闭区,结合区内地质出露情况和岩(矿)石物性参数识别特征,推测该高电阻率异常圈闭区是由深部存在的花岗岩体引起。

综上所述,高密度电阻率法可以在浅部精细探测齐大山铁矿伴生铌钽矿的蚀变岩和磁铁富矿的空间分布变化特征,音频大地电磁法则可以在中—深部准确识别定位伴生铌钽矿的蚀变岩和磁铁富矿的空间分布特征。值得一提的是,高密度电阻率法与音频大地电磁法的探测成果可以相互比对和验证,二者联合可以精细刻画伴生铌钽矿的蚀变岩和磁铁富矿之间空间分布变化特征。

3.3 综合地球物理探测成果探析

长期以来,在矿产资源勘查领域,由于受到地质钻探工程“一孔之见”的制约和加密钻孔成本高的限制,对已知矿体的隐伏部分进行精确圈定一直是技术难题,往往需要采用多种调查技术方法联合解决,且多以破坏性的山地工程为主(史长义等, 2022;毛景文等, 2024)。地球物理探测技术手段作为一种无损的绿色探测技术方法,特别是高密度电阻率法,一次布设测量就可以在有限空间内采集千余个电阻率异常数据,加密显示地下电性结构,实现了对地下地质结构的精细探测(苏兆锋等, 2012; Li et al, 2018; 李富等, 2019; Barbosa et al, 2020; Shin et al, 2021; Olenchenko et al, 2022), 这为浅部金属矿产资源的准确评价提供了技术支撑。相比之下,音频大地电磁法采用中—高频信号采集数据,既可实现较高的地质体探测分辨率,也可达到较大的探测深度。在齐大山铁矿伴生铌钽矿的探测研究过程中,通过联合使用高密度电阻率法与音频大地电磁法,得到的浅部探测成果可以相互验证。同时,依据上述浅部验证成果,在深部可以通过音频大地电磁法准确识别伴生铌钽矿的蚀变岩形态特征和规模大小,从而准确评价伴生铌钽矿的资源潜力。

事实上,对于齐大山铁矿伴生铌钽矿的高密度电阻率法探测成果,地表已有地质出露的情况可对其验证,而对于地下一定深度空间内的探测异常成果,也可得到下一步更深采矿平台的采矿剥岩所证实,并可与音频大地电磁法探测成果相互印证。上述伴生铌钽矿探测成果充分说明,通过发挥高密度电阻率法的高效快捷和高空间分辨率特性,以及音频大地电磁法对中深部地质体分辨率高的优势,可以在露天铁矿开发利用过程中同步实现伴生铌钽矿的蚀变岩形态特征和规模大小的快速精准评价,

进而优化开采设计,实现磁铁富矿与伴生铌钽矿的协同开发利用。值得一提的是,随着-240 m采矿平台的不断开拓,其剥离出露的岩(矿)体地质界限与高密度电阻率法的探测成果基本吻合,误差在1 m以内,进一步说明了高密度电阻率法和音频大地电磁法探测成果的有效性。

总而言之,对于存在伴生矿产资源的金属矿山,采用高密度电阻率法和音频大地电磁法联合探测,不仅可以精细探测伴生矿产资源浅—中—深部的空间分布特征,还可以对已有地质体边界进行精确划定。同时,上述地球物理探测技术方法也可以与局部钻探验证相结合,相互验证,达到以点带面的高精度地球物理探测效果,从而获得丰富的岩(矿)体空间结构数据,为进一步的安全高效采矿设计提供数据支撑和实践依据。

4 结论

(1)齐大山铁矿的磁铁富矿、云英岩化蚀变岩、绿泥片岩和花岗岩之间存在明显的电阻率参数差异,具有明显的地质—地球物理特征,可以采用多电极、小极距的高密度电阻率法和中—高频信号的音频大地电磁法联合探测其内伴生铌钽矿的空间分布特征。

(2)采用高密度电阻率法和音频大地电磁法联合探测了齐大山铁矿伴生铌钽矿的蚀变岩规模大小和形态特征及延深情况,含铌钽矿的云英岩化蚀变岩厚度为40~60 m,延深超过150 m,并与区内磁铁富矿在空间上相伴产出。

(3)多电极、小极距的高密度电阻率法不仅可以精细探测齐大山铁矿内含铌钽矿的蚀变岩空间分布特征,还可以精细圈定富铁矿体和蚀变围岩的地质界限,与音频大地电磁法相结合加大了探测深度,既可以为齐大山铁矿中磁铁富矿与伴生铌钽矿的资源潜力评价提供数据支撑,也可以为磁铁富矿与伴生铌钽矿同步开发利用中的采矿优化设计提供数据基础。

参考文献(References):

Barbosa MR, Braga MA, Da Gama MFP, et al, 2020. Electrical resistivity contrasts in the geotechnical assessment of iron

- caves, N4EN mine, Carajás, Brazil [J]. *Geophysics*, 85 (1): B1-B7.
- Christiansen R, Kostadinoff J, Bouhier J, et al, 2018. Exploration of iron ore deposits in Patagonia: insights from gravity, magnetic and SP modelling [J]. *Geophysical Prospecting*, 66(9): 1751-1763.
- Ishizu K, Goto T, Ohta Y, et al, 2019. Internal structure of a seafloor massive sulfide deposit by electrical resistivity tomography, Okinawa trough [J]. *Geophysical Research Letters*, 46(20): 11025-11034.
- Kwan K, Müller D, 2020. Mount Milligan alkalic porphyry Au-Cu deposit, British Columbia, Canada, and its AEM and AIP signatures: implications for mineral exploration in covered terrains [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 180: 104131.
- Li D X, Wang E Y, Song D Z, et al, 2018. Spatio-temporal evolution of apparent resistivity during coal-seam hydraulic flushing [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 15 (3): 707-717.
- Olenchenko V V, Osipova P S, 2022. Electrical resistivity tomography of alluvial deposits during prospecting for placer gold [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 63(1): 98-108.
- Shin Y, Shin S, Cho S J, et al, 2021. Application of 3D electrical resistivity tomography in the Yeoncheon titanomagnetite deposit, South Korea [J]. *Minerals*, 11(6): 563.
- Zeng Q D, Di Q Y, Liu T B, et al, 2020. Explorations of gold and lead-zinc deposits using a magnetotelluric method: case studies in the Tianshan-Xingmeng Orogenic Belt of Northern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 117: 103283.
- 陈振宇, 李建康, 周振华, 等, 2023. 硬岩型锂—铍—铌—钽资源工艺矿物学评价指标体系 [J]. *岩石学报*, 39(7): 1887-1907. Chen Zhenyu, Li Jiankang, Zhou Zhenhua, et al, 2023. Study on process mineralogical evaluation index system of hard rock lithium-beryllium-niobium-tantalum mineral resources [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39 (7) : 1887-1907.
- 邓攀, 陈玉明, 叶锦华, 等, 2019. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析 [J]. *中国矿业*, 28(4): 63-68. Deng Pan, Chen Yuming, Ye Jinhua, et al, 2019. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum [J]. *China Mining Magazine*, 28 (4) : 63-68.
- 韩鹏, 2020. 高密度电阻率法在探测不同充填类型溶洞中的正反演研究 [J]. *地质与勘探*, 56(6): 1219-1225. Han Peng, 2020. Forward modeling and inversion of the high-density resistivity method in detecting karst caves of different filling types [J]. *Geology and Exploration*, 56 (6) : 1219-1225.
- 何继善, 2019. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术 [J]. *中国有色金属学报*, 29(9): 1809-1816. He Jishan, 2019. Theory and technology of wide field electromagnetic method [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 29(9) : 1809-1816.
- 景国庆, 于文明, 何广宇, 等, 2022. 内蒙古正蓝旗桃山萤石矿床地质特征及找矿方向浅析 [J]. *矿产勘查*, 13(9): 1288-1296. Jing Guoqing, Yu Wenming, He Guangyu, et al, 2022. Geological characteristics and prospecting direction of the Taoshan fluorite deposit in Zhenglan Banner, Inner Mongolia [J]. *Mineral Exploration*, 13 (9) : 1288-1296.
- 李富, 周洪福, 唐文清, 等, 2019. 物化探方法在隐伏活动断裂探测中综合研究——以安宁河秧财沟断裂为例 [J]. *地球物理学进展*, 34(3): 1199-1205. Li Fu, Zhou Hongfu, Tang Wenqing, et al, 2019. Comprehensive study of geophysical and geochemical methods in detecting buried active faults: taking the Yangcaigou fault in Anning River as an example [J]. *Progress in Geophysics*, 34 (3) : 1199-1205.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 等, 2019. 中国铌钽矿成矿规律 [J]. *科学通报*, 64(15): 1545-1566. Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, et al, 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1545-1566.
- 李金铭, 2015. 地电场与电法勘探 [M]. 北京: 地质出版社. Li Jinming, 2015. *The geoelectric field and electrical prospecting* [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 李立兴, 李厚民, 付建飞, 等, 2022. 华北克拉通鞍山式铁矿床中发现新类型铌钽矿化 [J]. *中国地质*, 49(4): 1353-1354. Li Lixing, Li Houmin, Fu Jianfei, et al, 2022. A new type of Nb-Ta mineralization discovered in the Neoproterozoic Anshan-type iron deposit of the northern North China Craton [J]. *Geology in China*, 49(4): 1353-1354.
- 刘天佑, 2007. 地球物理勘探概论 [M]. 北京: 地质出版社. Liu Tianyou, 2007. *Conspectus of geophysical exploration* [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 刘永亮, 张伟, 刘振宇, 等, 2024. 高密度电阻率法和音频大地电磁法在猴场滑坡结构探测中的应用 [J]. *中国岩溶*, 43(2): 441-453. Liu Yongliang, Zhang Wei, Liu Zhenyu, et al, 2024. Application of high-density resistivity method and audio-frequency magnetotelluric method in the detec-

- tion of landslide structure in Houchang Town[J]. *Carsologica Sinica*, 43(2):441-453.
- 罗登贵,刘江平,王京,等,2014.活动断层高密度电法响应特征与应用研究[J].*地球物理学进展*,29(4):1920-1925.Luo Denggui, Liu Jiangping, Wang Jing, et al, 2014. Study on the response characteristics and application of high density resistivity method of active fault[J]. *Progress in Geophysics*, 29(4):1920-1925.
- 毛景文,刘敏,姚佛军,等,2024.当前中国找矿勘查值得关注的问题与发展方向[J].*矿床地质*,43(6):1211-1222. Mao Jingwen, Liu Min, Yao Fojun, et al, 2024. Some points concerned in field of prospecting and exploration in China and future considerations[J]. *Mineral Deposits*, 43(6):1211-1222.
- 蒙嘉琪,王志猛,贾三石,等,2024.基于地球物理技术圈定沉积变质型富铁矿体:辽宁鞍山齐大山铁矿例析[J].*现代地质*,38(1):87-97.Meng Jiaqi, Wang Zhimeng, Jia Sanshi, et al, 2024. Delineation of sedimentary metamorphic rich iron ore bodies based on geophysical techniques: case analysis of Qidashan iron ore in Anshan, Liaoning[J]. *Geoscience*, 38(1):87-97.
- 牛聪聪,覃鹏,方科,等,2021.物化探方法在寻找深部硫化铜矿中的应用:以赞比亚麻希巴矿床为例[J].*地质学报*,95(4):1273-1283.Niu Congcong, Qin Peng, Fang Ke, et al, 2021. Application of geophysical and geochemical methods in the search for deep sulfide ores: a case study from the Mashiba copper deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(4):1273-1283.
- 史长义,王惠艳,2022.深部矿产资源立体地球化学勘查方法技术体系[J].*地质学报*,96(11):3705-3721.Shi Changyi, Wang Huiyan, 2022. A system of techniques and methods for three-dimensional geochemical exploration for finding deep concealed mineral resources[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(11):3705-3721.
- 苏兆锋,陈昌彦,肖敏,等,2012.精细高密度电阻率法在白云岩矿采空区中的应用[J].*物探与化探*,36(增刊1):45-47. Su Zhaofeng, Chen Changyan, Xiao Min, et al, 2012. The application of precise high density resistivity method to the detection of goaf in a dolostone mine [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(Suppl.1):45-47.
- 孙浩,刘莹,王正,等,2022.音频大地电磁约束反演在地层识别中的应用:以哈密盆地为例[J].*地球科学*,47(11):4280-4293. Sun Hao, Liu Ying, Wang Zheng, et al, 2022. Constrained inversion of audio magnetotelluric for identifying strata: a case study in Hami Basin[J]. *Earth Science*, 47(11):4280-4293.
- 吴义布,余君鹏,司豪佳,等,2023.甘肃阿克塞县变粒岩型铌钽矿综合找矿方法及找矿模型[J].*地质与勘探*,59(3):570-579.Wu Yibu, Yu Junpeng, Si Haojia, et al, 2023. Comprehensive prospecting methods and model of the leptynite-type Nb-Ta deposit in Aksai County, Gansu Province [J]. *Geology and Exploration*, 59(3):570-579.
- 余君鹏,2024.祁连西段变粒岩型铌钽矿成矿机制与找矿模式研究[D].兰州:兰州大学. Yu Junpeng, 2024. Ore-forming mechanism and prospecting model of the Lepytynite-type Nb-Ta deposits in the western Qilian orogenic belt[D]. Lanzhou: Lanzhou University.
- 俞炳,邱海成,于昌明,等,2021.EH4音频大地电磁方法在辽东五龙金矿控矿构造及成矿预测研究中的应用[J].*黄金科学技术*,29(5):637-646.Yu Bing, Qiu Haicheng, Yu Changming, et al, 2021. Application of EH4 magnetotelluric method in ore-controlling structure and metallogenic prediction of the Wulong gold deposit in Liaodong Peninsula[J]. *Gold Science and Technology*, 29(5):637-646.
- 周世泰,1994.鞍山一本溪地区条带状铁矿地质[M].北京:地质出版社. Zhou Shitai, 1994. Geology of banded iron ore in Anshan-Benxi area [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 朱紫祥,胡俊杰,2017.高密度电法在岩溶地区溶洞勘查中的应用[J].*工程地球物理学报*,14(3):290-293. Zhu Zixiang, Hu Junjie, 2017. Application of high-density electrical method to exploration of karst caves [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 14(3):290-293.

Application of High-density Resistivity Method and Audio-frequency Magnetotelluric Method in the Detection of Associated Nb-Ta Ores in the Qidashan Iron Mine

DU Xin¹, JIA Sanshi², FU Guohui³, SUN Mingyang², CHU Huichao¹, YANG Xiaofeng¹

1. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China;

3. Ansteel Group Mining Co., Ltd., Anshan 114043, Liaoning, China

Abstract: A novel category of Nb-Ta-bearing greisenization rocks has been recently identified within the iron ore concentration district of the Anshan-Benxi area, located at the northeastern margin of the North China Craton. These rocks are predominantly found within the Qidashan open-pit mine, where traditional geological survey methods have proven inadequate for assessing the potential of associated strategic metal mineral resources. Consequently, the development and utilization of these Nb-Ta resources have been limited. Through a comprehensive study of the geological and geophysical characteristics of high-grade magnetite ore, greisenization rocks, chlorite schist, and granite, which host the associated Nb-Ta ore, particularly focusing on the distinct variations in electrical parameters among these rocks, a combined exploration strategy was employed. This strategy integrates the high-density resistivity method, utilizing small electrode spacing and multiple electrodes, with the audio-frequency magnetotelluric method, employing medium-to-high-frequency signals to effectively delineate the shape and scale of the Nb-Ta-bearing greisenization rocks. The findings demonstrate that both the high-density resistivity method and the audio-frequency magnetotelluric method are effective in precisely delineating the morphology and scale of Nb-Ta-bearing greisenization rocks, with thicknesses ranging from 40 to 60 meters and depths exceeding 150 meters. This indicates a significant potential for critical metal resources. Additionally, these geophysical techniques are capable of intricately detecting the geological structure of high-grade magnetite ore deposits and the demarcation between iron ores and various surrounding rocks. This provides essential data and empirical evidence for optimizing the design of safe and efficient mining operations, thereby facilitating the integrated development of iron ore and associated Nb-Ta resources.

Key words: Qidashan iron mine; associated Nb-Ta ore; high-density resistivity method; audio-frequency magnetotelluric method; greisenization