

地球物理勘查技术在矿山深部找矿中的应用

孟屹明^{1,2,3} 董向欣^{1,2,3*} 付兆健^{1,2,3} 刘彬^{1,2,3} 张裕波^{1,2,3} 李冬月^{1,2,3}

1. 山东省物化探勘查院, 中国·山东 济南 250000

2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 中国·山东 济南 250000

3. 地下资源环境高精度探测山东省工程研究中心, 中国·山东 济南 250000

摘要: 随着浅部矿产资源日益枯竭, 矿山找矿工作逐步向深部扩展, 这对勘探技术的精度和深度提出了更高要求。地球物理勘查技术因其非侵入性、高效性和适应复杂地质条件的能力, 在深部找矿中展现出重要价值。论文系统分析了地震勘探、电磁法、磁性勘探和重力勘探等技术在矿山深部找矿中的应用特点与实际效果, 结合当前找矿过程中面临的钻探难度大、成本高及环境压力等问题, 探讨了各类地球物理方法的优势与适用范围, 旨在为深部矿产勘探提供科学依据和技术参考, 提升找矿效率与成功率。

关键词: 地球物理勘查; 矿山深部; 找矿技术; 地震勘探; 电磁法; 磁性勘探; 重力勘探

Application of Geophysical Exploration Technology in Deep Mineral Prospecting of Mines

Yiming Meng^{1,2,3} Xiangxin Dong^{1,2,3*} Zhaojian Fu^{1,2,3} Bin Liu^{1,2,3} Yubo Zhang^{1,2,3} Dongyue Li^{1,2,3}

1. Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan, Shandong, 250000, China

2. Shandong Provincial Engineering Research Center for Geological Exploration, Jinan, Shandong, 250000, China

3. Shandong Provincial Engineering Research Center for High-Precision Detection of Underground Resources and Environment, Jinan, Shandong, 250000, China

Abstract: With the gradual depletion of shallow mineral resources, mineral exploration is progressively extending to greater depths, imposing higher demands on the precision and depth of exploration technologies. Geophysical exploration techniques have demonstrated significant value in deep mineral prospecting due to their non-invasive nature, high efficiency, and adaptability to complex geological conditions. This paper systematically analyzes the application characteristics and practical outcomes of seismic exploration, electromagnetic methods, magnetic exploration, and gravity exploration in deep mineral prospecting. Considering current challenges such as high drilling difficulty, elevated costs, and environmental pressures during exploration, the advantages and applicable scopes of various geophysical methods are discussed. The study aims to provide scientific foundations and technical references for deep mineral exploration, thereby enhancing prospecting efficiency and success rates.

Keywords: geophysical exploration; deep mine; prospecting technology; seismic exploration; electromagnetic method; magnetic exploration; gravity exploration

0 前言

面对不断增长的资源需求状况, 寻找新的矿产资源成为重要任务, 然而随着地表矿藏的逐渐减少, 深部矿产资源的开发尤为关键。在此背景情况之下, 地球物理勘查技术受广泛关注, 因其能高效准确识别地下地质结构, 这些技术提高了找矿的成功概率, 同时还减少了勘探成本和环境影响。

1 地球物理勘查技术的优势

1.1 高效率和广覆盖

地球物理勘查技术能在短时间内, 完成大范围区域地质信息采集, 显著提升勘探工作整体效率。该技术依托先进数据采集系统, 还有远程探测设备获取物性参数, 不依赖

密集钻探就可了解地下介质, 其作业方式以非接触式测量为主, 适合复杂地形条件下的快速普查, 在早期找矿阶段具备突出优势。通过对大面积区域进行系统性扫描, 可有效识别成矿潜力构造带或区段, 为后续详细勘探提供基础依据。此外, 现代地球物理仪器自动化水平高, 具备较强数据处理能力缩短作业周期, 提升数据采集一致性和重复性提高效率。

1.2 多样性和灵活性

地球物理勘查方法有很多种类, 涵盖重力磁法电法地震等技术路径, 每种方法针对不同地质目标, 都具有各自特定的适用性。这种多样性让勘查工作能依据, 具体地质背景和找矿目标来选, 可灵活选择合适的技术组合, 从而形成有针对性的勘查方案。各类方法在探测深度分辨率上, 以及对特定物性参数敏感度中, 都存在着一些明显的差异, 能够适

应不同类型矿床的需求,如某些方法适合浅部高分辨率成像,而另一些则更适合深部结构探测。通过多种方法协同进行应用,能实现对地下地质体多层次刻画,还可增强对复杂构造系统的理解能力。

1.3 降低探测成本

地球物理勘查技术在控制勘探成本上优势明显,在前期找矿阶段能减少不必要资源投入,和传统钻探方式相比。这类技术不用大规模开挖也不布设密集钻孔,仅布置有限观测点就能获得区域性地质信息,从而降低人力、设备和时间方面成本,因其具有非破坏性特点,在生态环境敏感区域更具可行性,能减少因施工而产生的环境修复方面支出。同时,地球物理方法可在较大范围初步圈定异常区域,避免盲目钻探造成资源浪费情况,让后续验证工作变得更加精准且高效。随着数据采集与处理技术不断发展,勘查过程自动化程度持续提高,进一步压缩作业周期和综合方面的成本,使其成为经济高效找矿手段之一。

2 矿山深部找矿面临的挑战

2.1 钻探和采矿难度大

随着矿山开采深度的持续增加,地下环境条件日趋复杂,给钻探和采矿作业带来了显著的技术挑战。地层压力随深度递增而显著升高,导致岩体稳定性下降,易引发井壁坍塌、卡钻等工程事故。同时,地温梯度效应使深部作业区域温度显著上升,对设备耐热性能及操作人员安全构成威胁。在高应力环境下,岩层表现出更强的非均质性和各向异性特征,影响钻进效率与轨迹控制精度。此外,深部矿体通常埋藏于多期构造运动形成的复杂地质结构之中,断层、褶皱等地质现象频发,增加了矿体定位与揭露的不确定性。

2.2 高成本和风险

深部矿产资源勘探与开发涉及大量资金投入,经济风险显著高于浅部资源开发。由于探测深度增加,所需设备性能要求更高,仪器维护与更换频率相应提升,直接推高了勘查成本。同时,深部作业周期长、技术复杂度高,导致人力与时间成本大幅增长。矿体埋深加大也意味着采掘工程规模扩大,巷道支护、排水、通风等配套系统建设投资成倍增加。除直接支出外,还需承担因矿体赋存条件不明或勘探误差带来的误判风险,可能造成重大经济损失。

2.3 环境与安全问题

矿山深部开发过程中,环境与安全问题日益突出,成为制约找矿与开采活动的重要因素。随着开采深度增加,地下水文条件更加复杂,矿坑突水、涌水等灾害发生的概率上升,严重威胁作业安全。深部岩层中可能存在有害气体或放射性物质,其释放过程若未得到有效控制,可能对矿区空气质量和生态环境造成破坏。同时,大规模地下开挖改变了原有地应力场分布,可能诱发地面沉降、岩层破裂甚至地震活动,带来长期地质安全隐患。

3 地球物理勘查技术在矿山深部找矿中的具体应用

3.1 地震勘探技术的应用

3.1.1 数据采集原理

地震勘探是基于弹性波在地下介质传播特性的,通过人工震源来激发地震波,利用高精度检波器系统记录响应信号,这些信号是在不同岩层界面反射、折射和透射产生的。该方法能够反映地下介质速度与密度分布特征,为深部地质结构识别提供基础数据。数据采集过程通常采用规则布设的测线系统,以此确保观测点空间分布具有连续性和完整性,进而提高探测结果的可靠性。随着技术发展,多分量探测技术和宽频带接收系统被引入,显著增强了对复杂地质条件的适应能力,提升了数据采集的稳定性和分辨率。野外施工需要综合考虑地形起伏和地表覆盖等因素,这些因素会对数据质量产生影响,要确保采集过程的科学性与有效性,为后续处理和解释奠定坚实基础。

3.1.2 图像处理流程

原始数据先进行去噪、静校正、速度分析等初步处理,之后进入偏移成像阶段,目的是恢复地下结构真实空间位置,现代地震数据处理广泛采用三维叠前时间偏移和全波形反演等先进技术,这些方法能更精确还原地下介质形态特征。在复杂构造区域成像精度更高,图像处理核心目标是突出断层、褶皱及潜在矿化带等地质要素细节信息,为后续地质建模和找矿预测提供可靠依据,处理过程中需结合地质背景与已知钻探资料进行约束,确保所得图像符合实际地质情况,提高解释结果可信度。

3.1.3 地质解释方法

对处理后的地震剖面进行系统分析,结合区域地质背景资料,依据已有钻孔数据构建具有地质意义的三维模型,在解释过程中重点追踪,地震剖面上的反射同相轴识别关键地质单元,像控矿构造、沉积盆地边界,还有岩浆侵入体等都是识别的重要对象。针对深部隐伏矿体开展工作,尤其是构造控矿型矿床进行相关研究,地震解释能提供有效的空间定位信息,以此辅助圈定成矿有利部位展开工作。解释工作需注重多学科资料融合分析,结合地球化学、地质填图等成果内容,增强对成矿系统的整体认识程度。

3.2 电磁方法的应用

3.2.1 探测机制原理

电磁方法的理论基础是地下介质,在电磁场作用下存在电性响应差异,通过天然或者人工场源进行激发,能够形成时变的电磁场,时变电磁场会在导电介质中,感应出相应的次级电流,再利用接收装置测量其产生的,电磁响应相关参数。该方法主要分成频率域和时间域两类,频率域方法通过调节激励频率,获取不同深度的信息,时间域方法依据关断电流后,次级场衰减特征反演地下电导率分布,由于电磁场传播特性对地下介质,导电性能高度敏感,所以该方法能

够有效识别金属矿化带,这类高导异常体。

3.2.2 数据采集方式

电磁勘探的数据采集依靠不同观测布置形式,像中心回线、偶极-偶极、长导线源等典型装置,各类装置依据探测深度与分辨率特点,适用于不同的勘查阶段,地面电磁法主要用于大范围区域快速普查,井中电磁法适合在已知矿体附近开展精细结构探测,随着多频段、多极化观测技术不断发展,电磁数据的空间覆盖能力和信噪比显著提升。这增强了对深部导电异常体的识别能力,合理的数据采集设计有助于提高探测精度,能为后续资料处理与解释提供高质量输入。

3.2.3 异常识别与建模

电磁数据经过初步处理之后,生成视电阻率断面图,该图用于识别高导或低导异常区域,进而推断潜在矿化带空间展布特征,结合三维正演模拟与反演计算工作,能够构建地下电性结构模型,此模型可增强对深部地质体形态的刻画精度,异常识别过程当中需充分考虑,地形起伏与围岩干扰等因素的影响,这样做可以避免异常识别出现误判现象。通过对电磁异常和构造蚀变带等,地质要素之间的空间关系进行综合分析,能够有效圈定深部找矿的具体靶区,为钻探验证和进一步勘查工作,提供科学依据与技术方面的支撑。

3.3 磁性勘探的应用

3.3.1 磁场测量基础

磁性勘探是基于岩石磁性的差异来开展的,通过测量地磁场总强度或者梯度变化,以此识别由磁性矿物所引起的局部磁场异常。该方法依赖高灵敏度磁力仪检测微弱磁场扰动能力,能够在较大范围内快速获取磁异常信息,适合用于大面积区域的初步筛查工作。数据采集一般采用地面网格布点或者航空磁测方式,前者适用于地形相对平坦区域的精细探测,后者则适合复杂地形或大范围快速覆盖,磁场测量过程中需要考虑地磁日变和仪器漂移等干扰因素,并且要在后续处理中进行校正,以此确保数据的准确性与连续性。

3.3.2 数据处理与反演

原始磁测数据一般会包含多种非地质因素干扰,像地磁日变、地形起伏以及仪器误差等,需要经过日变校正、地形改正、区域-局部异常分离等处理步骤,从而提取有效的磁异常信号。处理之后的数据能够进一步用于三维磁正演模拟与反演计算,把表面观测到的磁异常转换为地下磁性体的空间分布模型。现代磁测数据处理着重多尺度分析和深度约束条件的应用,提高了反演结果的稳定性和解释精度,使得磁性体的形态、埋深以及走向等参数可以实现定量刻画。

3.3.3 成矿关联分析

磁异常特征和矿体赋存状态联系密切,在铁矿、钛铁矿等强磁性矿床勘查中很明显,对磁异常和区域构造背景、岩浆活动等地质要素做相关性分析,能揭示深部控矿构造体

系空间展布特征。磁性勘探可用来圈定含矿岩体边界,还能辅助识别和成矿作用密切相关的蚀变带与断裂构造,为找矿靶区优选提供关键依据。在综合地球物理勘查里,磁性勘探常和其他方法联合使用形成互补效应,提升对深部成矿系统的整体认知水平。

3.4 重力勘探的应用

3.4.1 原理与测量方式

重力勘探基于地下介质密度差异引起的重力场变化,通过高精度重力仪测量地表重力加速度的微小变化来识别不同密度地质体的空间分布。该方法依赖于地球物理中重力场对地下地质结构的响应特性,适用于大范围区域的地质背景调查。数据采集通常采用网格状布点方式,确保观测数据具有良好的空间覆盖性和连续性,特别适合用于探测深部地质体和区域性构造格局。由于重力场受深部地质体影响显著,其探测深度较广,能够提供关于地下地质体的大致轮廓信息,为后续详细勘查提供基础依据。

3.4.2 数据处理与建模

重力数据需经过一系列处理步骤以消除非地质因素干扰,包括自由空气校正、布格校正及地形校正等。这些校正步骤旨在去除大气效应、海拔变化及地形起伏对测量结果的影响,从而获得更准确的地下密度信息。处理后的数据可通过二维或三维重力反演技术构建地下密度结构模型。现代重力数据处理注重多参数联合反演与地质约束条件的应用,提高了模型的稳定性和可靠性,使得深部密度异常的识别更加精准。

4 结语

综上所述,地球物理勘查技术在矿山深部找矿中发挥了不可替代的作用。随着探测深度的增加和技术手段的不断进步,各类地球物理方法在复杂地质条件下展现出良好的适应性和应用效果。地震勘探提供了高分辨率的地下结构信息,电磁法在识别导电性异常方面表现出较强的灵敏度,磁性与重力勘探则在大范围区域筛选和初步定位中具有显著优势。这些技术的协同应用,不仅提升了找矿的精准度,也有效降低了勘探风险和成本。在实际工作中,结合具体地质背景,合理选择和组合多种物探手段,能够更高效地识别深部矿体的空间展布特征。

参考文献:

- [1] 李闪.三维地球物理勘探技术在隐伏矿产勘查中的应用研究[J].世界有色金属,2023(17):103-105.
- [2] 刘晓斐.物探技术在地质找矿与资源勘查中的应用方法研究[J].世界有色金属,2023(14):63-65.
- [3] 李顺利,王俊星,杜好胜.地球物理勘查技术的发展与应用研究[J].广西物理,2023,44(2):18-20.
- [4] 常振宇.地球物理勘查技术在矿山深部找矿中的应用[J].世界有色金属,2022(17):58-60.