

免局部集中破坏,为厚煤层端头稳定控制提供了科学依据[3]。

5 数值模拟与现场验证分析

5.1 模型建立与边界条件设置

为揭示厚煤层综放开采端头围岩的稳定性演化规律,本文采用FLAC3D数值模拟软件建立三维地质-力学模型,对端头顶板在不同支护条件下的受力与变形特征进行分析。模型尺寸依据现场地质条件及采场布置确定,覆盖煤层、顶底板及采空区,纵向范围约80 m,横向宽度60 m,沿走向长度100 m。岩层结构分为顶煤、伪顶、直接顶、主顶及底板等层,分别赋予不同物理与力学参数,以反映层间性质差异。煤岩体采用弹塑性本构关系,顶板岩层采用摩尔-库仑准则以刻画其剪切破坏与塑性演化。模型施加初始三向原岩应力场与重力加载,边界条件设置为底部固定、侧向水平约束、顶部自由面,确保应力传递与位移场响应符合实际。采动过程通过分步削除煤体单元模拟采场推进及顶煤放顶过程,并引入不同支护参数(包括锚杆长度、锚索间距、预应力水平等)进行组合分析,计算顶板位移、塑性区演化及应力分布变化规律。该模型兼顾地质真实性与计算稳定性,为端头支护优化提供了科学的数值基础和力学分析依据[4]。

5.2 模拟结果与优化方案验证

模拟分析结果显示,未支护条件下端头顶板受采动扰动显著,变形集中且破坏范围较大。顶板最大下沉量约420 mm,塑性区深度超过3.5 m,应力集中系数高达1.62,顶板关键层出现剪切贯通破坏,导致拱形承载结构被削弱,冒顶风险显著增大。采用优化支护方案后(包括锚索加密布置、锚固长度延长、顶板注浆加固及支架预紧力提升),端头围岩变形得到显著抑制。模拟结果表明,顶板最大下沉量降至180 mm,塑性区厚度减至1.5 m,应力集中系数降低至1.15,围岩应力场分布趋于均匀,关键层弯曲中心上移,顶板形成稳定拱形结构。优化支护体系有效改善了顶板的承载能力与能量耗散特性。现场监测结果进一步验证模拟结论,优化方案实施后,端头冒顶次数减少约70%,顶板离层量下降60%,放顶煤回收率提高6%以上。数值模拟与实测数据高度吻合,表明支护优化设计具有显著的工程实效性与推广价值,为类似地质条件下端头稳定控制提供了可靠的技术路径[5]。

5.3 围岩应力演化与稳定性判据

基于数值模拟与现场监测结果,对端头支护后的围岩

应力演化规律进行系统分析。结果显示,在采动扰动初期,顶板及支架受载迅速上升,应力峰值集中于端头关键层与支架接顶区域,反映出顶板原始应力的重新分配与集中释放。随着支护体系逐步形成稳定受力结构,应力波动趋缓并进入“先升后稳”的动态平衡阶段。现场压力盒监测结果表明,支架平均载荷较无支护状态提高约20%,但峰值应力波动幅度显著下降,体现出支护体系对应力分担与能量缓释的双重效果。顶板离层仪监测数据显示,端头支护后离层量较未支护阶段降低60%,顶板下沉速率显著减缓。基于能量释放率判据的计算分析表明,稳定阶段顶板能量积聚速率下降约45%,围岩进入耗能稳定阶段,表明支护体系有效抑制了应力集中与突发能量释放。综上,优化支护结构通过改变顶板受力边界与载荷传递路径,提高了围岩系统的整体刚度与能量耗散能力,实现了端头围岩的长期稳定控制,为厚煤层综放开采的安全高效运行提供了理论支撑与工程依据。

6 结语

本文提出以“锚网索-支架-辅助支护”协同体系为核心的优化支护模式,通过形成“强-弱结合、刚柔互补”的多级支护结构,实现应力的分层承载与能量的渐进释放。数值模拟与现场监测结果验证,该体系可有效降低顶板应力集中度,延缓垮落步距,改善顶板稳定性与围岩受力均衡。基于分区控制与动态调节策略,支护体系具备了柔刚兼顾的适应能力,显著提高端头区域的整体稳定性。未来研究可结合数字孪生与实时监测技术,实现端头支护的智能化调控,为厚煤层综放开采的安全、高效与绿色开采提供持续技术支撑。

参考文献

- [1] 武争文.大倾角厚煤层综放工作面端头支护技术优化[J].机电信息,2022,(16):85-88.
- [2] 郭高川.特厚煤层综放回采巷道强矿压显现机理及控制技术研究[D].河南理工大学,2023.
- [3] 张国祥.软厚煤层综放工作面巷道支护形式与参数优化[J].煤炭科学技术,2009,37(07):35-37+41.
- [4] 王飞.松软厚煤层综放工作面煤壁固结力学特性及防片帮技术[D].安徽理工大学,2025.
- [5] 葛非.大采深特厚煤层高应力区全煤巷道及开切眼锚杆支护技术.河北省,开滦,2002-01-01.

Optimization of Ground Magnetic Exploration Data Processing and Anomaly Interpretation Methods

Di Yan

Nuclear Industry 240 Research Institute, Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract

Ground magnetic exploration, as an important geophysical detection method, plays a critical role in mineral resource investigation, engineering geological survey, and subsurface structure identification. With the continuous improvement of exploration accuracy and expansion of data scale, traditional data processing and anomaly interpretation methods have gradually shown limitations under complex background field conditions. Focusing on the optimization requirements of data processing workflows and anomaly interpretation methods, a systematic analysis is conducted from the aspects of data preprocessing, anomaly extraction and enhancement, and interpretation model construction. By examining the improvement paths of denoising techniques, regional field separation, and multi-scale information extraction, the capability of anomaly signal identification is effectively enhanced. Meanwhile, the integration of quantitative inversion and multi-parameter fusion methods improves the reliability and accuracy of interpretation results. On this basis, an integrated optimization framework for data processing and interpretation is established, providing technical support for improving the quality of magnetic exploration results and their engineering application value.

Keywords

ground magnetic exploration; data processing; anomaly extraction; inversion interpretation; multi-source integration

地面磁法勘探数据处理与异常解释方法优化

闫迪

核工业二四〇研究所, 中国·辽宁 沈阳 110000

摘要

地面磁法勘探作为重要的地球物理探测手段,在矿产资源调查、工程地质勘查及地下结构识别中发挥着关键作用。随着勘探精度与数据规模的不断提升,传统数据处理与异常解释方法在复杂背景场条件下逐渐显现出适应性不足的问题。围绕数据处理流程与异常解释方法优化需求,从数据预处理、异常提取增强及解释模型构建等环节进行系统梳理。通过分析去噪处理、区域场分离及多尺度信息提取技术的改进路径,提升异常信号识别能力。同时结合定量反演与多参数融合方法,增强解释结果的可靠性与精度。在此基础上,构建数据处理与解释一体化优化体系,为提高磁法勘探成果质量与工程应用价值提供支撑。

关键词

地面磁法勘探; 数据处理; 异常提取; 反演解释; 多源融合

1 引言

地面磁法勘探在地质调查与资源开发领域应用广泛,其技术体系经历了从单一测量向综合分析转变的过程。随着探测对象复杂程度不断提高,磁异常信号常受到区域场变化、地形影响及人为干扰等多重因素叠加,导致数据质量与解释精度面临更高要求。传统处理方法多依赖经验判断,在复杂背景条件下易出现异常识别不清与解释偏差问题。近年来,数据获取精度持续提升,多源信息融合逐步成为发展趋势,推动磁法数据处理由单环节优化向全过程协同演进。在

此背景下,对数据预处理技术、异常增强方法及解释模型进行系统优化,有助于提升异常识别的分辨能力,并增强解释结果与地质实际之间的匹配程度,从而更好服务于资源勘查与工程建设需求。

2 地面磁法勘探数据处理的基础理论

地面磁法勘探以地磁场变化为基础,通过测量地表磁场强度及其空间变化特征,识别地下磁性体分布与结构形态。地磁场由主磁场、区域场及局部异常场叠加构成,其中主磁场具有稳定性,区域场反映大尺度地质构造特征,局部异常则对应矿体或构造体的磁性差异。数据处理的核心在于从复杂叠加信号中分离有效异常信息,使其能够真实反映地下地质体特征。磁异常的幅值与形态受磁性体埋深、规模及

【作者简介】闫迪(1994-),男,中国河南许昌人,硕士,助理工程师,从事铀矿地质勘查及生产研究。

磁化方向等因素影响,表现出明显的非线性特征。理论分析与处理方法需结合磁场延拓、导数运算及频率域变换等技术手段,对原始观测数据进行转换与重构,以提升异常分辨能力与解释精度,从而为后续反演与地质解释提供可靠基础^[1]。

3 地面磁法勘探数据预处理方法优化

3.1 原始数据去噪与干扰信号识别方法

原始磁测数据在采集过程中易受到环境磁扰、电磁设备干扰及仪器漂移等因素影响,导致信号中混入非地质异常信息。去噪处理需要针对不同噪声来源构建差异化识别策略,通过时序分析与频谱分析相结合的方式,对随机噪声与周期性干扰进行区分。高频噪声可通过滤波方法进行抑制,低频漂移则需借助基准点数据进行校正。干扰信号识别过程中,利用统计特征分析能够有效判断异常值分布范围,通过设定阈值实现异常数据剔除。处理过程中强调数据完整性与连续性,避免过度滤波造成有效异常削弱,从而在保证数据质量的前提下保留真实地质信息。

3.2 地磁日变改正与区域场分离技术

地磁场随时间变化呈现明显日变特征,该变化受太阳活动及电离层变化影响,若不加以处理将对异常识别产生干扰。日变改正通过引入基站观测数据,对测区内观测值进行时间同步校正,使不同时间获取的数据具有可比性。区域场分离则针对大尺度背景磁场变化,通过多项式拟合或趋势面分析方法构建区域场模型,将其从总场中剔除,突出局部异常特征。该过程需要在平滑程度与异常保留之间取得平衡,避免区域场模型过度拟合导致异常信息丢失。通过合理选择分离尺度与算法参数,可实现区域背景与局部异常的有效分离,提高后续异常分析的准确性。通过构建标准化处理流程,可实现不同来源数据的有效整合,为后续综合分析提供高质量数据基础^[2]。

4 地面磁法异常提取与增强技术优化

4.1 磁异常分离与背景场去除方法优化

磁异常分离的关键在于将局部异常从总磁场中有效提取,使其能够独立反映地下磁性体特征。背景场去除通过趋势分析与滤波技术实现,对低频成分进行削弱,从而突出高频异常信号。处理过程中需要结合地质背景信息,对分离尺度进行合理设定,避免将重要异常误判为背景成分。多种滤波方法可协同应用,如带通滤波与小波分解,以实现不同频率成分的分层处理。优化策略强调异常信息完整性与空间连续性,使分离结果既具备清晰边界,又能够反映真实地质结构特征。

4.2 异常增强处理与边界识别技术改进

异常增强技术通过数学变换放大磁异常特征,使弱异常得以清晰呈现。常用方法包括垂向导数、解析信号及倾角导数等,这些方法能够增强异常边界信息并提高分辨能力。边界识别依赖于异常梯度变化,通过计算磁场变化率,可有

效定位磁性体边缘位置。处理过程中需控制增强强度,避免噪声同步放大而影响识别效果。结合多种增强方法进行对比分析,有助于提高边界识别的稳定性与可靠性,使异常解释更加精确^[3]。

4.3 多尺度异常信息提取与融合方法

地面磁异常在不同空间尺度上表现出差异性特征,大尺度异常反映区域构造,小尺度异常对应局部矿体或构造细节。多尺度分析通过分解磁场信号,将不同尺度信息进行分离与提取,从而实现多层次解释。小波变换与多分辨率分析方法能够有效捕捉不同尺度异常特征,并保持空间信息完整性。融合处理通过对各尺度信息进行重构,形成综合异常图像,使宏观与微观特征得到同步表达。该方法能够提高异常识别的全面性,为复杂地质条件下的解释工作提供更为可靠的数据支撑。

5 地面磁法异常解释方法优化路径

5.1 定性解释向定量反演转化方法

地面磁法异常解释由经验判读向定量反演转化,需要构建以物理模型为核心的数据驱动分析体系。通过建立地下磁性体几何模型,将观测磁异常数据与模型响应进行拟合,实现参数反演与空间结构重建。反演过程中采用最小二乘反演、约束反演及正则化方法,对磁化强度、埋深及形态参数进行求解,反演误差控制在5%以内能够满足工程应用需求。数据输入需经过标准化处理,磁异常数据网格间距通常控制在10 m ~ 50 m 范围内,以保证空间分辨能力。利用快速傅里叶变换实现频率域计算,可显著提升反演效率。针对复杂地质条件,可引入三维反演算法,通过迭代计算逐步优化模型,使计算结果与实测数据误差逐步收敛。通过对反演结果进行切片分析与剖面提取,可实现地下结构精细刻画,为资源评价与工程设计提供量化依据。

5.2 多参数联合反演与地质约束融合方法

单一磁法数据在解释过程中存在多解性问题,多参数联合反演通过引入重力、电法或地震数据,实现多源信息协同约束。数据融合过程中需要对不同物理场数据进行空间配准,统一坐标系统及分辨率,误差控制在3%以内可保证融合精度。联合反演模型通过引入耦合约束函数,将不同数据之间的响应关系进行关联,使反演结果更加稳定。地质约束通过引入钻孔数据、地质剖面及岩性分布信息,对模型参数范围进行限定,减少不合理的出现。计算过程中采用加权最小二乘方法,对不同数据赋予权重系数,权重比例根据数据可靠性在0.2 ~ 0.8 范围内进行调整。通过多轮迭代优化,使各类数据残差逐步降低至设定阈值以内。该方法能够显著提高异常解释的准确性,使结果更符合实际地质条件,增强解释成果的工程适用性。

5.3 异常解释结果验证与不确定性分析方法

异常解释结果需通过多维度验证与不确定性分析进行