

# 瞬变电磁法在探测采空塌陷区方面的应用

王晓龙

山西省煤炭地质一一五勘查院有限公司 山西 大同 037000

**摘要：**瞬变电磁法基于电磁感应原理，通过观测地下介质二次感应电磁场变化，实现对采空塌陷区的有效探测。在实际应用中，该方法可精确定采空区分布范围，探测塌陷区深度，评估采空区充填状况，并分析塌陷区水文地质条件。然而，信号干扰、数据处理难题及探测参数矛盾等问题制约其发展。通过综合勘察、技术优化与参数合理选择，可显著提升探测准确性与可靠性，为工程建设和灾害防治提供重要依据。

**关键词：**瞬变电磁法；探测采空塌陷区；应用

## 引言

随着矿产资源的大规模开采，采空塌陷区引发的地质灾害问题日益突出，准确探测采空塌陷区成为保障工程安全与地质环境稳定的关键。瞬变电磁法凭借探测效率高、受地形限制小等优势，在地质勘探领域广泛应用。本文针对采空塌陷区探测需求，系统阐述瞬变电磁法工作原理，深入分析其在采空塌陷区探测中的具体应用场景，探讨应用过程中面临的挑战，并提出相应应对策略，为该技术的优化与推广提供参考。

## 1 瞬变电磁法工作原理

瞬变电磁法（Transient Electromagnetic Method，简称TEM）作为地球物理勘探领域重要的电磁勘探方法，基于法拉第电磁感应定律与麦克斯韦方程组构建其理论基础。在勘探作业时，通过在地表或井下设置回线或电偶极子等发射装置，向地下供入具有特定占空比的脉冲电流，在脉冲电流关断瞬间，由于电流的突然变化会在其周围产生一个瞬变的一次磁场。这一磁场以波的形式向地下介质传播，当遇到不同电性参数（电导率、磁导率等）的地质体时，会在地质体内部激发出感应电流。感应电流遵循楞次定律，其产生的二次磁场方向与一次磁场变化趋势相反，目的是阻碍一次磁场的变化。二次磁场以涡流的形式在地质体中流动，并随着时间向远处和深处扩散，其强度和分布特征与地下地质体的电性结构、规模和埋深密切相关。随着时间推移，二次磁场逐渐向外扩散并减弱，且不同深度地质体产生的二次磁场衰减速度存在差异，浅层地质体的二次磁场衰减较快，深层地质体的二次磁场衰减相对较慢。在一次场关断后，利用高灵敏度的接收装置（如感应线圈、磁通门磁力仪等）在地表或井下测量不同时刻的二次磁场或感应电动势。通过对这些随时间变化的二次磁场数据进行采集、记录和分析，结合电磁场理论与数值模拟方法，

反演计算地下地质体的电阻率、埋深、规模等参数，从而实现了对地下地质结构和地质体分布的探测与解释。例如，在寻找金属矿时，矿体通常具有较低的电阻率，与围岩形成明显的电性差异，这种差异会在二次磁场响应上呈现出独特的异常特征，通过识别和分析这些异常，地质勘探人员能够圈定潜在的矿体位置和范围，为矿产资源勘查与开发提供关键的地球物理依据。

## 2 瞬变电磁法在探测采空塌陷区方面的具体应用

### 2.1 采空区分布范围确定

（1）瞬变电磁法通过向地下发射一次脉冲磁场，在其间歇期间观测二次感应涡流场，以此探测介质电阻率。由于采空区与围岩电阻率有差异，未充水呈高阻、充水呈低阻，在大面积测区布置测线，采集不同位置瞬变电磁响应数据，可圈定与围岩电阻率不同区域，确定采空区范围。（2）对采集到的数据进行处理和分析，绘制视电阻率剖面图或平面等值线图。在图中，明显偏离正常背景电阻率值的区域，极有可能对应采空区。对比不同测线的数据，可追踪异常区域的走向和延伸范围，从而更为精确地确定采空区的边界，为后续工程建设和灾害防治提供基础资料。（3）在实际应用中，需充分考虑地质条件的复杂性，如地层的不均匀性、其他地质构造对电阻率的干扰等。可结合地质调查资料，对瞬变电磁法圈定的异常区域进行综合判断，排除非采空区因素导致的电阻率异常，确保确定的采空区分布范围准确可靠<sup>[1]</sup>。

### 2.2 塌陷区深度探测

（1）瞬变电磁法利用电磁感应原理，二次场的衰减特性与探测深度紧密相关。早期二次场对应浅层信息，衰减较快；晚期二次场反映深层情况，衰减较慢。通过测量不同延迟时间的二次场响应，能够获取不同深度的地电信息。在塌陷区探测中，根据这一原理，设置合适的观测时间窗口，采集不同时刻的瞬变电磁信号。（2）

对采集的信号进行反演计算,建立地下电阻率结构模型。依据模型中电阻率异常区域的深度位置,确定塌陷区的埋藏深度。例如,若在某一深度层出现明显低阻异常,且与已知塌陷区的电性特征相符,则该深度即为塌陷区的深度。可通过多道数据的对比分析,提高深度探测的精度。(3)为提高深度探测的准确性,可采用不同装置参数进行试验,如改变发射和接收线圈的大小、匝数等。不同的装置参数对不同深度的响应灵敏度有所差异,综合多种参数测量结果,能更全面准确地确定塌陷区深度。结合钻孔资料等已知信息,对反演结果进行校准和验证,进一步提高塌陷区深度探测的可靠性。

### 2.3 采空区充填情况评估

(1)采空区充填情况不同,其电阻率特征也会有所不同。若未充填或充填不密实,内部多为空气或松散物,呈相对高阻特性;若用低阻材料充填或充填体含水,则呈相对低阻。瞬变电磁法能够有效捕捉这种电阻率变化,对采空区及周边细致测量,获取详细电阻率分布信息。(2)分析电阻率异常的形态和幅度,可对采空区充填情况进行初步评估。例如,若电阻率异常范围较大且幅值较高,可能意味着采空区充填不充分,存在较多空洞;若异常幅值较低且分布相对均匀,表明采空区可能已被较好地充填。对比不同位置的测量数据,判断充填的均匀性。(3)结合地质资料和其他地球物理方法(如地质雷达等)的结果,对瞬变电磁法的评估结果进行综合分析。多种方法相互验证,能够更准确地确定采空区的充填程度、充填材料的分布情况等,为采空区的后续处理和利用提供科学依据,降低因采空区充填问题引发的工程风险。

### 2.4 塌陷区水文地质条件分析

(1)塌陷区的水文地质条件对工程安全和环境影响重大。瞬变电磁法对低阻体敏感,而富含水区域通常表现为相对低阻特征。在塌陷区及其周边开展瞬变电磁测量,能够快速识别出可能存在的富水区域。通过分析瞬变电磁响应的强度和分布范围,初步判断地下水体的规模 and 大致位置。(2)利用不同时刻的二次场数据,通过特定反演算法精准还原地下不同深度的电阻率结构,依据电阻率与地下水体关联特性,进而分析地下水位的变化情况。例如,某深度层电阻率随时间变化明显,或暗示该深度有动态水体,如地下水位的升降。结合长期监测数据,可掌握塌陷区水文地质条件的动态变化规律。(3)结合地质构造信息,分析富水区域与断层、裂隙等构造的关系。断层和裂隙往往是地下水运移的通道,通过瞬变电磁法确定的富水区域,若与这些构造存在关

联,则需重点关注地下水的流动方向和补给情况,为制定合理的水文地质防治措施提供依据,有效防范因塌陷区水文地质问题引发的地质灾害<sup>[2]</sup>。

## 3 瞬变电磁法在探测采空塌陷区方面应用中面临的挑战与应对策略

### 3.1 面临的挑战

#### 3.1.1 地质干扰因素影响

地下地质环境复杂多变,为瞬变电磁法探测采空塌陷区带来诸多干扰。不同岩性地层的电阻率差异复杂,断层破碎带、含水构造与采空塌陷区在电磁响应特征上存在相似性,使得有效信号与干扰信号相互叠加混淆。例如,富含金属矿物的岩层会产生强烈的电磁异常,与采空区的异常信号相互干扰,导致异常解释出现偏差。地表覆盖层的不均匀性,如厚度、湿度差异,会改变电磁信号的传播路径和衰减特性,进一步增加信号识别难度。地下水的动态变化,其水位涨落、流速及水质差异导致的导电性变化,也会对探测结果产生显著影响,干扰对采空塌陷区真实状态的准确判断。

#### 3.1.2 数据采集与处理难度大

瞬变电磁法数据采集过程易受多种因素制约,采集到的数据存在噪声大、信噪比较低等问题。采集设备的性能局限,如发射功率不足、接收灵敏度不够,会导致信号强度弱、采集数据不完整。野外复杂地形条件下,测量电极和发射线圈的布设难以达到理想状态,影响数据采集的规范性和准确性。数据处理阶段,由于采空塌陷区地质条件复杂,电磁响应规律难以精确把握,传统的数据处理算法难以有效去除噪声、提取有效信息。采空区边界模糊、内部结构不规则,使得数据反演过程中多解性问题突出,难以获得准确的地质模型,从而影响对采空塌陷区的精准探测与分析<sup>[3]</sup>。

#### 3.1.3 探测深度与分辨率的矛盾

在瞬变电磁法探测中,探测深度与分辨率存在难以调和的矛盾。随着探测深度的增加,电磁信号在地下介质中传播时能量不断衰减,信号变得微弱,导致分辨率降低,难以识别深部采空塌陷区的精细结构,如小尺寸空洞、薄夹层等。为了提高分辨率,需增强信号强度、缩短探测周期,但这又会限制探测深度,无法满足对深部采空塌陷区全面探测的需求。这种矛盾使得在实际探测中,难以同时兼顾对采空塌陷区浅部和深部的高精度探测,增加了准确评估采空塌陷区规模、形态及稳定性的难度,给后续的工程治理带来不确定性。

### 3.2 应对策略

#### 3.2.1 综合地质勘察与多方法联合探测

综合地质勘察与多方法联合探测是应对地质干扰因素影响的有效手段。在开展瞬变电磁法探测前,详细收集研究区的地质资料,包括地层岩性、地质构造、水文地质条件等,通过现场踏勘直观了解地质地貌特征,为瞬变电磁法探测提供基础地质背景信息。将瞬变电磁法与地质雷达、高密度电法等其他地球物理探测方法相结合,发挥不同方法的优势。地质雷达对浅部目标体具有较高分辨率,高密度电法可有效反映地层电阻率的横向变化,与瞬变电磁法在探测深度和响应特征上形成互补。通过多种方法探测结果的相互验证和对比分析,能够更准确地识别采空塌陷区的位置、范围和结构特征,减少单一方法因地质干扰导致的误判。

### 3.2.2 优化数据采集与处理技术

优化数据采集与处理技术是提升探测质量的关键。在数据采集方面,选用性能更优的采集设备,根据探测目标和地质条件合理配置发射功率、接收灵敏度等参数,确保采集到的信号强度和质量。针对复杂地形,采用灵活的测量电极和发射线圈布设方式,如利用无人机辅助布设线圈,提高布设效率和准确性。在数据处理阶段,引入先进的信号处理算法,如小波变换、自适应滤波等,有效去除噪声,增强有效信号。运用基于人工智能的反演算法,如神经网络、遗传算法,结合地质先验信息,减少数据反演的多解性,构建更符合实际地质情况的采空塌陷区模型,提高数据处理结果的准确性和可靠性。

### 3.2.3 合理选择探测参数与方法组合

合理选择探测参数与方法组合有助于解决探测深度与分辨率的矛盾。根据采空塌陷区的大致埋深、规模和地质条件,科学选取瞬变电磁法的探测参数,如发射

电流、发射频率、采样间隔等。对于浅部采空塌陷区,适当提高发射频率、缩短采样间隔,以提升分辨率,准确获取浅部精细结构信息;对于深部目标,降低发射频率、增大发射电流,保证信号有足够能量传播到深部,在一定程度上兼顾探测深度。根据探测需求将瞬变电磁法不同装置形式相结合,如中心回线装置对浅部异常敏感,重叠回线装置具有较高分辨率,大定源回线装置适合深部探测,通过合理组合装置形式,实现对采空塌陷区浅部和深部的高效探测,平衡探测深度与分辨率的关系<sup>[4]</sup>。

### 结语

综上所述,瞬变电磁法在采空塌陷区探测中展现出独特的技术优势,在确定采空区范围、探测塌陷深度、评估充填情况及分析水文地质条件等方面成效显著。尽管面临地质干扰、数据处理及参数矛盾等挑战,但通过综合勘察、技术优化和合理选择探测参数等策略,可有效提升探测精度。未来,随着技术的不断创新,瞬变电磁法有望在采空塌陷区探测领域发挥更大作用,为地质灾害防治和工程建设安全提供更坚实保障。

### 参考文献

- [1] 黄海昆,罗腾腾,何玉婷,等.瞬变电磁法在某煤矿采空区积水探测中的应用[J].矿产与地质,2022,36(5):1004-1010.
- [2] 聂西坤.瞬变电磁法在深部采空区探测中的应用[J].世界有色金属,2021(7):194-195.
- [3] 郑建峰.瞬变电磁法在铁矿采空区探测中的应用[J].能源与环保,2020,42(6):82-85.
- [4] 唐维峰.瞬变电磁法在煤矿采空区探测中的应用[J].百科论坛电子杂志,2020(20):3105-3106.