

深部矿产勘查中地球物理反演技术的适用性分析

杨 禄

内蒙古第八地质矿产勘查开发有限责任公司 内蒙古 乌海 016000

摘 要: 地球物理反演技术是深部矿产勘查的关键手段。本文阐述其与深部矿产勘查的基础理论,分析常用技术分类及共性特征,探讨地质条件、技术局限、数据与先验信息等关键影响因素,提出多方法联合、算法优化、先验信息融合改进及与其他勘查技术协同等优化方向,为提升该技术在深部矿产勘查中的适用性提供参考。

关键词: 深部矿产勘查; 地球物理反演技术; 适用性; 影响因素; 优化方向

引言: 随着矿产资源需求增长,深部矿产勘查愈发重要。地球物理反演技术凭借能推算地下地质体物理参数分布的优势,成为深部勘查的有力工具。然而,深部地质条件复杂,反演技术面临诸多挑战,如多解性、分辨率局限等。深入分析其适用性,明确影响因素并探索优化方向,对提高深部矿产勘查效率与准确性意义重大。

1 地球物理反演技术与深部矿产勘查的基础理论

1.1 地球物理反演技术核心概念

地球物理反演技术的本质是依托对地球物理场的观测数据,结合已掌握的地质先验信息,通过特定技术方法推算地下地质体相关物理参数分布的过程。这些物理参数涵盖岩性特征、构造形态、矿产赋存状态等,为认识地下地质情况提供关键依据^[1]。反演技术的基本逻辑建立在正演模拟与反演计算的紧密关联之上。正演模拟是依据已知地质模型计算对应地球物理场响应,反演计算则是从实际观测的地球物理场数据反向推导可能的地质模型,二者共同构成从地质体到数据、再从数据到地质体的转化路径,形成观测数据、物理模型、地质模型三者间的有序转化逻辑。反演技术具备多解性这一显著特征,相同的观测数据可能对应多种不同的地质模型,增加精准推断地下情况的难度。非线性是其另一重要属性,地下地质体物理参数与地球物理场响应之间多呈非线性关系,给反演计算带来挑战。反演结果高度依赖地质先验信息,先验信息的全面性与准确性直接影响反演精度。同时,反演技术存在分辨率局限性,受观测设备性能、数据质量等因素制约,难以精准刻画微小尺度的地下地质细节。

1.2 深部矿产勘查的技术需求与地质特征

深部矿产勘查对地球物理技术有着明确的核心要求。大探测深度是首要需求,需能够穿透数千米的地质层,获取深部矿产所在区域的地质信息。高分辨率同样关键,要能清晰区分地下小尺度的含矿地质体与周围非

矿岩体,精准呈现矿体的形态与分布。强抗干扰能力不可或缺,需有效抵御地表环境、地层屏蔽、噪声等各类干扰因素,确保获取的地质信息真实可靠。此外,还需具备区分深部矿与非矿异常的能力,避免将非矿地质体引起的地球物理异常误判为矿异常,提升勘查的准确性。深部勘查靶区有着独特的地质属性。地层结构复杂,不同时代、不同岩性的地层相互叠置,且地层界面常因构造运动变得模糊不清。岩性横向变化大,同一水平层面上岩性可能在短距离内发生显著改变,增加地质体识别难度。构造破碎带发育,断层、褶皱等构造现象频繁出现,破坏地层的连续性与完整性。矿化类型多样,同一勘查区域内可能存在多种不同成因、不同特征的矿化现象,且矿体规模往往较小,进一步加大深部矿产勘查的复杂度。

2 深部矿产勘查常用地球物理反演技术分类及共性特征

2.1 主要反演技术类型及原理概述

重力与磁法反演技术,基于地下地质体间的密度、磁性差异运作。当地下地质体的密度或磁性不同,会引发地表重力场、磁场异常。通过捕捉这些异常,便能反推地质体的空间分布与物理属性。在深部地质构造圈定上,其作用显著,可帮助锁定潜在的矿产构造区域;对磁性或高密度矿化体的分布推断也优势突出,能初步确定矿化体的范围与走向^[2]。电法与电磁法反演技术,依靠地质体的电性差异开展工作,像电阻率、极化率、电导率等参数,不同地质体及其中的矿产、含矿流体存在明显差别。通过发射电场或电磁场,接收分析响应信号,反演地下电性结构。在探测深部导电或极化性矿产时表现出色,可精准定位矿产位置,对含矿流体的运移路径、分布范围探测能力强。地震反演技术借助弹性波在地下岩层传播时速度、反射折射规律的变化,反演地下岩层速度结构、界面形态。能清晰揭示深部地层序列,

明确地层接触方式与分布规律,精准刻画控矿构造,为寻找与地层、构造相关的矿产提供关键依据。重磁电震联合反演等其他反演技术,采取多参数融合策略。单一反演技术仅能获取某一类物理参数信息,有片面性。联合反演技术整合重力、磁法、电法、地震等技术获取的密度、磁性、电性、弹性等多类参数,实现信息互补验证,减少单一技术的不确定性,提升反演结果的可靠性与准确性。

2.2 深部勘查反演技术的共性特征

反演目标的复杂性体现在技术需完成多重任务。既要反演地下地质体的空间形态,明确其大小、走向、埋深等几何特征,也要获取地质体的物理参数,掌握密度、磁性、电性等属性信息,更要精准提取其中的矿化信息,确定矿化范围、强度与类型。深部地质体受多期构造运动影响,常与其他地质体相互叠加,干扰信号多,进一步增大目标识别难度。数据约束的局限性普遍存在于深部勘查中。深部地层对信号的衰减作用显著,地表接收的观测数据信噪比普遍较低,有用信号易被噪声掩盖。受勘查设备性能与勘查成本限制,数据量增加往往伴随分辨率下降,二者难以兼顾,有限的对反演结果的约束能力较弱,难以精准确定地下地质体的细节特征。计算过程的高要求源于深部反演的特殊场景。深部反演模型需覆盖较大空间尺度,包含的地质单元与参数数量极多,这对反演算法提出严苛要求。算法需具备高效计算能力,快速处理海量数据与复杂模型,还要保证计算过程稳定,避免因模型复杂出现计算异常,同时需具备良好收敛性,确保快速得出稳定可靠的反演结果。

3 地球物理反演技术适用性的关键影响因素

3.1 地质条件因素

地层结构复杂性对反演技术适用性影响显著。地层分层连续性不同,连续稳定地层利于反演清晰识别地质界面,受构造运动破坏间断或缺失时,反演难准确捕捉界面特征。地层厚度变化干扰反演效果,均匀地层便于建稳定反演模型,骤变或渐变地层增加模型构建难度。岩性差异加剧复杂性,不同岩性物理参数有别,交替频繁区域反演信号混乱,影响地质界面精准界定。构造发育程度直接左右反演结果可靠性^[3]。断裂、褶皱等构造规模不同,大型构造异常范围广、特征明,反演易识别;小型构造异常信号弱,反演难捕捉。构造走向与探测方向契合度关键,一致时反演易追踪延伸,交错时易现信号叠加干扰。构造破碎程度不可忽视,破碎严重区域岩性混杂、参数紊乱,使反演存更多不确定性,显著增加多解性。矿化体特征是反演有效识别矿化异常的核心。

与围岩物理参数差异显著时,异常信号突出,反演易锁定目标;差异微弱则信号被掩盖,反演难区分。形态影响空间分布刻画,层状矿化体易呈连续异常带,脉状、块状可能形成孤立异常点或块,增加定位难度。埋深制约反演效果,浅部信号衰减少、特征清,深部信号经长距离传播衰减严重,反演识别难度大幅提升。

3.2 技术自身局限因素

探测深度与分辨率的平衡问题是反演技术的固有难题。单一反演技术若侧重大深度探测,需扩大信号接收范围、降低采样密度,必然导致分辨率下降,难以清晰呈现深部小尺度地质体细节;若聚焦高分辨率成像,需加密采样、增强信号解析能力,却会限制探测深度,无法触及深部矿产勘查所需的探测范围。这种深度与分辨率之间的矛盾,使得单一技术难以同时满足深部勘查对探测范围与细节刻画的双重需求。物理参数敏感性差异影响反演技术对特定矿产的适配性。不同反演技术针对的物理参数不同,有的技术对密度变化敏感,适合探测高密度矿产;有的技术对电性参数反应敏锐,更适配导电型矿产。对于深部弱矿化异常,部分技术因对对应物理参数敏感性不足,难以捕捉微弱的参数变化,即便矿化体客观存在,也无法形成明显的反演异常信号,导致漏判或误判。抗干扰能力强弱决定反演结果与地质真实情况的契合度。地表干扰中,复杂地形会使观测信号产生畸变,人文电磁干扰会掩盖地下真实信号,抗干扰能力弱的技术易受这些因素影响,输出的反演结果偏离实际。地下干扰同样棘手,非矿异常体(如高磁性岩体、高导电地层)形成的信号常与矿化异常混淆,抗干扰能力不足的技术难以区分二者,导致反演误将非矿异常判定为矿化异常。

3.3 数据与先验信息因素

数据质量是支撑反演结果可靠性的基石。观测数据的完整性不足时,缺失的关键数据会使反演模型存在漏洞,无法全面反映地下地质情况;数据精度不达标,会直接将误差带入反演过程,导致计算结果偏离真实值。信噪比高低同样关键,低信噪比数据中有用信号被噪声淹没,反演难以提取有效信息,误差会在计算中不断放大,严重降低反演结果的可信度。先验信息丰富度对约束反演多解性具有重要作用。地质信息能为反演提供区域地质背景,明确地层分布、构造走向等基础框架;钻探数据可提供地下局部精准的地质体物理参数与形态特征,为反演模型校准提供依据;化探信息能辅助圈定矿化异常范围,缩小反演目标区域。先验信息充足时,可从多个维度约束反演过程,大幅降低多解性;信息匮乏

时,反演缺乏有效引导,易陷入多种合理地质模型的困境,难以确定最贴合实际的结果。

4 提升地球物理反演技术深部勘查适用性的优化方向

4.1 多方法联合反演技术发展

多方法联合反演技术通过整合不同类型地球物理反演结果发挥作用。每种单一反演技术仅能捕捉地下地质体某一类物理参数信息,存在各自的缺陷与局限,有的技术对密度敏感却难以识别电性差异,有的技术擅长刻画地层结构却对矿化体响应微弱^[4]。联合反演需先明确不同技术的参数互补逻辑,再将这些不同技术获取的密度、磁性、电性、弹性等参数信息系统融合,用一种技术的优势弥补另一种技术的不足,减少单一技术带来的片面性。这种互补效应能有效降低反演多解性,让原本模糊的地质模型更加清晰,同时提升对深部矿化异常的识别精度,更精准地区分矿与非矿异常信号。

4.2 反演算法优化

反演算法优化聚焦研发更高效、稳定的非线性反演算法。深部地质体模型结构复杂,包含的参数数量多、空间尺度大,传统反演算法在处理这类模型时,常出现计算耗时久、结果不稳定或难以收敛等问题,无法满足深部勘查对效率与精度的需求。新型非线性反演算法通过改进数学模型与计算逻辑,引入自适应迭代策略,增强对复杂深部模型的适配能力,即便面对岩性多变、构造发育的地质场景,也能快速处理海量数据,减少计算过程中的误差积累。算法效率提升可缩短反演周期,稳定性增强能避免计算异常,二者共同提升反演技术应对复杂深部勘查场景的能力。

4.3 先验信息融合技术改进

先验信息融合技术改进的核心是建立更高效的融合机制。地质、钻探等多源先验信息包含区域地质背景、局部地层参数、矿化异常线索等关键内容,这些信息对约束反演多解性、提升结果可信度至关重要。传统融合方式常存在信息衔接不畅、利用不充分等问题,新的融合机制通过优化信息处理流程,构建标准化信息转换

接口,将地质图件、钻探数据、化探成果等不同形式的先验信息,转化为反演模型可直接利用的参数与约束条件,实现先验信息与反演过程的深度结合。这种深度融合能为反演提供更精准的引导,减少无效模型的产生,大幅强化对反演结果的约束作用。

4.4 与其他勘查技术的协同

与其他勘查技术的协同注重加强反演技术与深部钻探、遥感、化探等技术的配合应用。反演技术擅长从宏观上刻画地下地质结构与矿化分布,但缺乏直接验证与局部精细信息;深部钻探能提供地下精准的实物地质资料,验证反演结果真实性;遥感技术可快速获取大范围地表与浅部地质信息,为深部反演划定目标区域;化探技术能圈定矿化异常晕,辅助反演锁定矿化核心区。通过构建统一的信息共享平台,搭建综合勘查技术体系,让反演技术与这些技术相互配合、信息共享,反演结果为其他技术提供方向指引,其他技术成果为反演优化提供依据,最终提升整体找矿效率。

结束语

地球物理反演技术在深部矿产勘查中作用关键,但受多种因素制约,适用性受限。通过发展多方法联合反演、优化算法、改进先验信息融合及加强与其他勘查技术协同等优化方向,可有效提升其适用性。未来,持续创新和完善相关技术,将进一步推动深部矿产勘查事业发展,为保障国家资源安全提供有力支撑。

参考文献

- [1]柳建新,童孝忠,郭荣文.深部矿产资源地球物理勘查与应用[J].地球物理学报,2021,62(12):4869-4904.
- [2]李晓斌,吕庆田,孟贵祥.深部矿产资源地球物理勘查技术与应用[J].地球物理学报,2022,60(11):4334-4360.
- [3]闫佳佳,刘蓓,赵亮,等.深部金属矿产资源勘查技术方法与研究分析[J].西部资源,2024,(04):116-120.
- [4]慈增辉,刘上,李兴康.地球物理勘探在地下矿产资源勘查中的作用与应用[J].中国金属通报,2025,(01):116-118.