

累积-结构破坏”演化路径：降温初期，土体表层先冻结形成冻结锋面；随温度降低，冻结锋面向下推进，未冻区水分在渗透压与毛细力作用下向冻结区迁移，在孔隙中形成冰透镜体与冰夹层；冰体体积膨胀产生冻胀应力，当应力超过土体或衬砌结构抗拉强度时，引发开裂、隆起等破坏，冻胀量随冻结深度增加而增大，至稳定冻结期达到峰值。

融沉灾害源于“冰体消融-土体饱和-有效应力降低-压缩沉降”的物理过程：升温阶段，冻结土体中的冰体逐步消融，转化为自由水，使土体处于饱和或过饱和状态；冰体消融导致土体颗粒骨架失去支撑，有效应力减小，在自重与上部荷载作用下，土体颗粒重新排列、压实，产生竖向融沉变形；若融水排泄不畅，会加剧土体软化，导致融沉量增大，当融沉变形不均匀时，易引发结构开裂、失稳等次生灾害^[2]。

5 季节性冻土区灌区冻融灾害防控技术

5.1 基于勘察成果的工程设计防控技术

5.1.1 渠道断面形式优化设计

根据冻胀等级采用差异化断面：强冻胀区选用弧形坡脚的梯形断面（边坡比 1:2.5~1:3.0），减弱冻胀力集中；中弱冻胀区采用 U 型断面，提升结构整体性。渠底设置 10~15cm 厚防冻胀垫层，边坡衬砌采用台阶式结构，预留 5~8cm 伸缩缝，填充聚氨酯弹性密封材料，释放冻胀变形应力。

5.1.2 渠基与堤身防冻胀材料选型

渠基优先选用非冻胀性材料（级配砂石、碎石）换填，换填深度为冻深的 1.0~1.2 倍；堤身采用“粉质黏土+粉煤灰”混合填料（质量比 7:3），掺加 3%~5% 水泥改良，提升抗冻性与压实度。衬砌材料选用纤维混凝土（掺量 0.9kg/m³）或复合土工膜（厚度 ≥0.5mm），增强抗拉裂与防渗性能。

5.1.3 建筑物基础防冻害设计措施

基础形式采用深基础（桩基础、沉井），埋深低于冻深 1.5m；浅基础设置隔冻层（泡沫混凝土、珍珠岩板，厚度 15~20cm），阻断冻胀力传递。基础周边铺设砂砾石排水层（厚度 ≥30cm），降低地下水位；在基础与上部结构间设置橡胶隔震垫，缓冲不均匀冻融变形。

5.2 施工阶段防控技术

5.2.1 冻土区施工时机选择

优先在非冻结期（5~9 月）施工，避免冻土扰动；若需冬季施工，采用“保温+防冻”措施：对基坑覆盖岩棉保温被（厚度 ≥5cm），浇筑混凝土时掺入早强防冻剂（掺量 3%~5%），确保施工环境温度 ≥5℃，防止土体冻融循环引发结构缺陷。

5.2.2 土体改良施工技术

换填法：挖除冻融敏感层（粉质黏土、粉土），换填级配砂石，分层压实（压实度 ≥95%）；压实法：采用重型振动压路机，分层碾压（层厚 20~30cm），提升土体密实度，

降低含水率；化学加固法：向土体注入水泥-水玻璃浆液（体积比 1:1），形成固化体，增强抗冻融能力。

5.2.3 防渗与排水系统施工要点

防渗系统：渠道衬砌采用“混凝土面板+土工膜”复合结构，接缝处采用热熔焊接，焊接强度 ≥ 母材强度；排水系统：渠堤设置纵向盲沟（间距 20~30m）与横向排水孔（坡度 3%~5%），盲沟采用碎石填充，外包土工布，确保融水快速排出，降低地下水位。

5.3 运行期养护与监测防控技术

5.3.1 灌区工程日常养护措施

定期清理渠道淤积（每年 1~2 次），修补衬砌裂缝（采用环氧树脂砂浆）；冬季结冰前放空渠道，减少水体对土体的补给；春季融化期巡查渠堤，及时处理边坡鼓凸、渗漏等隐患，避免灾害扩大。

5.3.2 冻融灾害监测系统构建

监测指标包括冻深、土体温度、地下水位、冻胀量、融沉量及结构应力；设备选型：选用埋入式温度传感器（精度 ±0.1℃）、测斜仪（量程 ±30°）、孔隙水压力计（量程 0~500kPa）；数据采集采用无线传输系统，实时上传至监控平台，采样频率为 1 次/天（冻结期加密至 1 次/6 小时）。

5.3.3 灾害预警与应急处置方案

基于监测数据设定预警阈值（冻胀量 ≥10cm、融沉量 ≥15cm 时触发预警），通过短信、平台推送预警信息；应急处置：冻胀开裂时采用灌浆封堵裂缝，融沉沉降时采用注浆加固基础，边坡失稳时及时削坡减载并铺设土工格栅，快速控制灾害发展^[3]。

6 结论

本文聚焦季节性冻土区灌区工程地质勘察与冻融灾害防控核心问题，通过系统分析冻土特性、工程地质条件及灾害形成机制，提炼出针对性技术体系。研究明确了季节性冻土“冻强融弱”的力学特征及冻融循环对土体结构的劣化机理，揭示了粉质黏土、粉土等敏感地层与浅埋地下水是灾害高发的关键诱因。总结出“基础资料收集-专项勘察-成果精准应用”的勘察流程，提出基于冻胀融沉等级的差异化勘察技术方案。构建了“设计优化-施工管控-运维监测”全周期防控体系，包括渠道断面优化、防冻材料选型、土体改良等关键技术，为冻土区灌区工程安全建设提供了科学依据与实践支撑。

参考文献

- [1] 岩土勘察在地质灾害防治中的应用研究[J]. 项光俊;余朝欢.生态与资源,2024(01)
- [2] 岩土工程地质灾害防治技术及预控研究[J]. 黄欣.四川建材,2023(01)
- [3] 地质灾害防治工程勘察与设计质量控制[J]. 刘佳海.世界有色金属,2022(17)

Precision Control of Mine Underground Penetration Survey Based on Gyroscopic Orientation

Bin Zhang

Shanxi Xinzhou Shenda Wanxin Anping Coal Industry Co., Ltd., Xinzhou, Shanxi, 034100, China

Abstract

To address the constraints of complex underground coal mine environments on the accuracy of penetration surveying, this paper takes gyroscopic orientation technology as the core, combines with practical underground surveying scenarios, analyzes key factors affecting measurement accuracy, and proposes targeted accuracy control strategies. By establishing a practical model and conducting comparative experiments, the applicability and reliability of gyroscopic orientation technology in underground penetration surveying are verified. Data tables are used to quantify accuracy indicators, and measurement processes are optimized with the help of diagrams. The study shows that this technology can effectively counteract interferences such as underground magnetic fields and light, controlling penetration surveying errors within the allowable range, thus providing data support for efficient tunneling in coal mines.

Keywords

Gyroscopic Orientation; Coal Mine Underground; Penetration Surveying; Precision Control; Error Analysis

基于陀螺定向的煤矿井下贯通测量精度控制

张斌

山西忻州神达万鑫安平煤业有限公司, 中国·山西 忻州 034100

摘要

为解决煤矿井下复杂环境对贯通测量精度的制约问题, 本文以陀螺定向技术为核心, 结合井下测量实操场景, 分析影响测量精度的关键因素, 提出针对性精度控制策略。通过搭建实操模型, 开展对比试验, 验证陀螺定向技术在井下贯通测量中的适用性与可靠性, 补充数据表量化精度指标, 结合示意图优化测量流程。研究表明, 该技术可有效抵消井下磁场、光线等干扰, 将贯通测量误差控制在允许范围, 为煤矿高效掘进提供数据支撑。

关键词

陀螺定向; 煤矿井下; 贯通测量; 精度控制; 误差分析

1 引言

随着煤矿开采向深部延伸, 井下巷道布局愈发复杂, 贯通测量作为保障巷道精准对接、规避安全风险的核心环节, 对测量精度提出极高要求。传统定向技术易受井下地质条件、电磁干扰、通视障碍等因素影响, 常出现测量误差超标, 导致巷道贯通偏差, 引发返工、安全事故等问题。陀螺定向技术凭借自主定向、抗干扰能力强、无需通视等优势, 逐步替代传统技术成为井下贯通测量的主流方案。本文围绕该技术的精度控制要点展开研究, 为煤矿井下贯通测量工作提供实操指导。

2 陀螺定向技术原理及在井下贯通测量中的应用优势

2.1 陀螺定向技术核心原理

陀螺定向技术基于陀螺仪的定轴性与进动性, 通过测量地球自转角速度在陀螺仪敏感轴上的投影, 确定真北方向, 进而获取测量点的方位角。在煤矿井下应用中, 通常采用陀螺经纬仪作为核心设备, 通过对中、整平、定向观测、数据计算等步骤, 将地面已知方位传递至井下巷道, 为贯通测量提供基准方向。其核心逻辑是利用陀螺仪的稳定性, 抵消井下环境干扰, 实现方位角的精准测量, 为后续巷道掘进的方向控制提供数据依据。相较于传统光学定向、罗盘定向技术, 陀螺定向无需依赖地面控制点通视条件, 可在井下封闭、复杂巷道环境中独立完成定向作业, 大幅降低了通视障碍对测量工作的制约, 同时具备测量效率高、方位角精度稳定等特点, 契合煤矿井下高效掘进的施工需求^[1]。

【作者简介】张斌(1983-), 男, 中国河北唐山, 本科, 工程师, 从事地测防治水研究。

2.2 井下贯通测量中陀螺定向的应用优势

煤矿井下环境特殊,高湿度、强电磁干扰、有限作业空间、光线昏暗等因素均会影响测量工作的开展。传统定向技术受这些因素影响较大,例如罗盘定向易受井下电磁设备干扰,导致方位角偏差;光学定向依赖通视条件,在长距离、多转折巷道中难以实施,且测量周期长,影响施工进度。陀螺定向技术则能有效规避上述问题,其优势主要体现在三方面:一是抗干扰能力强,陀螺仪通过内部惯性原理实现定向,不受外部电磁、磁场干扰,可在井下机电设备密集区域稳定作业;二是测量效率高,单次定向观测时间短,无需布设大量中间控制点,能快速为巷道掘进提供方位基准;三是精度稳定性好,在长距离井下贯通测量中,陀螺定向的方位角误差可控制在 $\pm 2''$ 以内,远优于传统技术,保障巷道贯通的精准度。

3 煤矿井下陀螺定向贯通测量精度影响因素分析

3.1 设备因素

陀螺经纬仪的精度等级、设备运行状态直接决定定向测量的基础精度,是保障贯通测量质量的首要硬件前提。若设备未按规定定期校准,陀螺仪的灵敏度、定轴性会逐步衰减,导致观测数据重复性差、偏差超标;仪器对中、整平误差若超过 $\pm 0.5\text{mm}$,会使陀螺仪敏感轴与测量基准面不重合,引发方位角计算误差叠加。此外,井下作业空间狭窄、巷道转折多,仪器安置操作受限,若选用体积过大、按键繁琐、无自动补偿功能的设备,不仅增加安置难度,还易因操作步骤繁杂引发人为失误,进一步放大测量误差,难以满足深部煤矿高精度贯通需求^[2]。

3.2 环境因素

井下环境的复杂性是影响陀螺定向精度的重要外部因素,多维度干扰叠加易导致测量误差放大,需针对性防控。一方面,井下巷道无恒温恒湿条件,温度昼夜波动可达 15°C 以上、湿度常超85%,剧烈温湿度变化会引发仪器内部金属零件热胀冷缩、光学部件受潮起雾,改变陀螺仪定轴性与灵敏度等核心机械性能,导致观测数据波动,降低观测稳定性;另一方面,井下巷道围岩含磁性矿物时会形成局部磁场,机电设备运行产生的高频电磁场,虽不会直接干扰陀螺仪惯性定向原理,但会干扰全站仪、经纬仪等辅助测量工具的电子读数模块,造成读数偏差,间接影响贯通测量精度。同时,井下巷道坡度不均、地面附着浮煤积水导致平整度不足,会增加仪器对中整平难度,引发安置误差,进一步削弱测量精度。

3.3 人为操作因素

人为操作的规范性对陀螺定向精度至关重要,是把控测量误差的核心环节。测量人员的专业技能水平、操作熟练度及责任意识,直接影响仪器安置、定向观测、数据记录与

计算等各环节的准确性。例如,定向观测时若观测时间把控偏差、读数视线不垂直,会导致观测数据离散度增大;数据计算时公式应用混淆、数值取舍未遵循规范,会将初始误差进一步放大,严重影响最终贯通精度。此外,井下高温、昏暗、空间狭窄的恶劣环境,易使测量人员快速产生疲劳,导致操作动作变形、注意力不集中,进而降低操作规范性,显著增加偶然误差风险。

3.4 测量流程因素

陀螺定向贯通测量是一项环环相扣的系统性工作,流程设计的科学性与执行的规范性直接决定整体测量精度,任一环节出现疏漏都可能引发误差累积,影响最终贯通效果。从地面控制点方位传递、井下定向观测实施,到观测数据处理、成果转化应用,每个环节均需建立严格的管控标准与复核机制。若地面控制点未经过多级校准,精度不足会直接导致初始方位基准出现偏差,该误差会随井下测量流程逐级放大,影响定向成果可靠性;井下定向观测时,若观测次数未达规范要求、异常数据筛选缺乏统一标准,易让粗差混入有效数据,干扰最终结果判定;数据处理流程不规范,未结合实际场景对观测数据进行针对性误差修正,会使设备、环境、操作等多源误差叠加累积,大幅降低贯通测量精度,甚至引发巷道贯通偏差。

4 基于陀螺定向的井下贯通测量精度控制策略

4.1 优化设备选型与校准管理

结合煤矿井下作业特点,选用精度等级不低于 $\pm 1.5''$ 、体积小、操作便捷的陀螺经纬仪,优先选择具备自动对中、整平功能及数据自动记录模块的设备,从硬件层面降低人为操作误差。建立设备定期校准制度,每月联合第三方专业机构开展灵敏度、定轴性、方位角精度全项校准,每日作业前通过地面基准点对比完成简易校验,确保设备处于最佳工作状态。同时,加强设备维护保养,配备专用防潮防尘箱,作业中做好防撞防护,延长设备使用寿命,保障测量精度稳定性。

4.2 强化井下环境适应性管控

针对井下高湿度、强电磁、地形复杂等环境对测量精度的多重影响,采取分层分类管控措施,最大化降低环境干扰。在仪器安置区域,提前清理巷道杂物、浮煤及积水,用水平尺反复校准地面平整度,必要时搭建可调节高度的钢结构临时操作台,搭配防滑垫固定仪器底座,确保仪器安置稳固无偏移。作业前采用便携式温湿度记录仪精准监测,若环境参数超出仪器工作阈值,通过局部通风装置调节气流、小型工业除湿机控湿、防爆取暖设备增温,维持仪器适配环境。同时,优先避开绞车房、变电所等电磁设备密集区域布设观测点,若无法避开,采用加厚金属屏蔽罩包裹辅助测量工具,搭配接地处理隔离电磁场,同步核对屏蔽前后读数差值,保障辅助工具读数精度稳定。