物探超前探测技术在金属矿山的应用——以云南长安金矿为例

杨威[1],和祥[1,2*],刘鹏[1],段学斌[1],秦海琳[1],张聪[1]

1.云南黄金矿业集团股份有限公司,云南 昆明 650215;
2.中国地质大学水资源与环境学院(北京),北京 100083

摘 要:长安金矿作为多金属成矿集中区重要矿山,深部地质构造极其复杂、成矿环境特殊,在长期开采中,井下不良地质体及水害隐患突出,威胁生产安全、制约开采效率,可能引发事故,阻碍矿产资源开发,对矿山可持续运营形成挑战。以长安金矿作为研究对象,聚焦井下物探技术在不良地质体和水害探测中的应用。通过分析矿山井下地质条件和主要灾害类型,将地震波法(TST)与复频电导超前探水法(CFC)相组合,开展现场试验和数据解析,构建针对该矿山不良地质体和水害的探测技术方案,对长安金矿长安矿段1 450 m回风平巷、1 350~1 300 m斜坡道和1 350 m中段平巷进行探测,得到预报成果图并进行综合分析。1 450 m回风平巷存在不良地质体1处,1 350~1 300 m斜坡道2处,1 350 m中段平巷3处,突水风险依次增高。该研究为提升长安金矿井下灾害预警能力和保障矿山安全生产提供了科学支撑。

关键词:矿产资源;物探技术;灾害预警;地震波法;复频电导超前探水法;长安金矿;云南省

中图分类号:TD74 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2518(2026)04-0895-17 **DOI:**10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.364

引用格式:杨威,和祥,刘鹏,等.物探超前探测技术在金属矿山的应用——以云南长安金矿为例[J].黄金科学技术,2026,34(4):895-911.YANG Wei,HE Xiang,LIU Peng,et al.Application of Advanced Geophysical Detection Technology in Metal Mines:A Case Study of the Chang'an Gold Mine,Yunnan Province[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):895-911.

矿产资源作为人类文明进程中不可或缺的物质基础,支撑着全球工业化进程和社会经济发展(蒋莉,2021)。然而,随着矿产资源的进一步开发,制约矿山安全生产的因素开始涌现,其中不良地质体和水害是制约矿产资源高效开发的核心因素(吴绍咏,2022;张国栋等,2023)。

长安金矿作为我国西南地区重要的黄金生产基地,开采区域地处云南省哀牢山南段,哀牢山推覆构造带金平推覆体中南部,工程地质(王英,2023)和水文地质条件(石志峰,2019)复杂特殊,导致矿区开采问题多且开采难度大(周癸武等,2021)。区域地形起伏剧烈,呈南高北低、东西高、中部低的态势,相对高差约为330 m,最低侵蚀基准面标高为1 585 m。复杂地形使大气降水(Li et al,2023)和地表径流汇水(Zhang et al,2023)路径多样,为地下不良地质体孕育以及水赋存与运移提供了多元空间条件(李菊红等,2021;赵杨杉等,2024)。长安金矿存在断层破碎带、岩溶发育区和软弱夹层等不良地质体,破坏岩体完整性,降低岩体强度,威胁巷道稳定,易引发突水等灾害(朱习宁,2023),造成矿石贫损(张秀华等,2023),增加矿山开采成本。中奥陶统南板河组碳酸盐岩(灰岩、白云岩)是主要含水层,外围发育落水洞等岩溶地貌,内部以溶蚀裂隙储水,深部岩溶随埋深减弱,富

收稿日期:2025-12-08;**修订日期:**2026-04-02

基金项目:云南黄金矿业集团股份有限公司项目"物探超前地质预报技术在地下开采矿山的应用研究"(编号:云金选研202411-4)资助

作者简介:杨威(1999—),男,云南大理人,技术员,从事矿山水工环工作。E-mail:15670958982@163.com

*通信作者:和祥(1986—),女,云南丽江人,高级工程师,从事矿山水工环工作。E-mail:18787251831@163.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

水性中等且随深度衰减(许敏捷等,2021)。F_6控矿断裂带控制着金矿体分布,也是天然阻水屏障,分隔志留系与奥陶系含水层使之成为独立单元,天然状态无水力联系,但构造活动可能改变其导水性(尹哲,2022),成为潜在突水通道,加剧了灾害防治的复杂性。

随着开采深度的增加,该矿山主采区已至海拔1 400 m以下,地质灾害风险显著提升(辛未等,2022)。传统防治手段以水文地质测绘(王亮亮等,2022;史进飞,2023)和钻探(Fang et al,2023)为主,但在长安金矿复杂条件下该方法的局限逐渐暴露。首先,钻探工序繁杂,单孔施工需3~5 d,多轮深部钻探影响生产接续,且为点式探测,难覆盖巷道前方三维空间,存在"漏判"风险,曾有钻孔未揭示的小型溶洞引发突水。其次,高水压区域钻探可能因揭露高压水体导致"冲孔"水害事故,危及施工安全(Xia et al,2025)。这些问题使传统方法难以满足现代化矿山对水害超前预警的精准性和时效性要求,需引入更先进的技术(孙祥瑞,2025)。物探技术具有非接触性、大范围探测的优势,成为破解矿山井下探测难题的关键(徐睿知,2025)。通过观测地下介质电阻率(Jamali et al,2021)等物理参数差异,可间接推断不良地质体和含水构造的空间分布。随着科技的进步,涌现出多种物探方法,包括直流电法(Cui et al,2023)、瞬变电磁法(TEM)(Feng et al,2024)、钻孔瞬变电磁法(薛俊杰等,2024)、地质雷达法(樊晓龙等,2017)、地震波法(TST)(郭美延等,2022;敬晓晏等,2025)和复频电导超前探水法(CFC)(赵晓鹏等,2020;杨波等,2024)等。研究人员结合长安金矿特殊地质条件,通过对TGS、TSP、TST、CFC和地质雷达多个探测方法的预测结果进行对比,得出TST和CFC探测法可精准判断X掌子面前方不良地质体的性质、位置和规模,识别隐伏构造和含水区域,确定掌子面前方含水位置和水量,为掘进提供超前信息(刘振雄,2025)。这对日后长安金矿的井下作业具有重要意义。

鉴于长安金矿复杂地质状况和严峻水害形势,本研究选取1 450 m回风平巷、1 350 m中段平巷和1 350~1 300 m斜坡道作为主要探测对象,预报范围为1 450 m回风平巷164.76~264.76 m、1 350~1 300 m斜坡道168.62~268.62 m、1 350 m中段平巷200.38~300.38 m,各工程预报距离为100 m,共完成预报300 m。本研究拟梳理矿区地质和水文资料,结合现场试验优化设备参数与观测系统,形成适用的组合探测方案,并构建"数据采集—异常解释—风险预警"体系(李雷等,2019)。该成果将为长安金矿灾害防治提供支撑,为西南类似矿山安全开采提供借鉴,助力资源开发与环境保护协调发展。

1 研究区域概况

长安金矿区位于金平县城270°方向10 km处,地处我国西南部哀牢山—红河成矿带南段,隶属金平县铜厂乡铜厂村委会管辖,面积约为1.32 km^2。

长安金矿大地构造位置处于扬子准地台(Ⅰ级)、丽江台缘褶皱带(Ⅱ级)、点苍山—哀牢山断褶束(Ⅲ级)和金平断凹(Ⅳ级)中部甘河断裂北侧。矿区构造发育,按走向大致可划分为近EW向和近SN向。区域水文地质单元位于鱼礼河南岸,夹于湾家湾—节节梁子与新寨—上寨分水岭之间,为相对完整的径流—排泄区。矿山露天转地下等开采活动会影响周边环境地质,露天开采的采坑、废渣易引发滑坡和泥石流等地质灾害。同时,地下开采易导致地面塌陷、地裂缝,改变地下水动力条件。因此,从长远发展和后续工作考虑,探明矿区地下不良地质体和水害工作刻不容缓。

该区域矿产资源丰富,有金、镍、铜和钼等具工业意义的矿产。矿区附近主要有金平—老勐国防公路通过,从昆明至老勐距离为400 km,老勐至铜厂距离为60 km。金平至矿区距离约为42 km,总体交通较便利(图1)。

2 技术方法及工作流程

2.1 地震波法(TST)

地震波法(TST)是隧道散射地震成像技术的简称,其观测系统采用空间布置,接收与激发系统布置在隧道两侧围岩中(王兆林,2023)。地震波由小规模爆破、电火花震源或冲击震源产生,并由隧道专用检波器接收。TST可有效地判别和滤除来自隧道侧面和上下地层的地震回波,仅保留掌子面前方回波,避免虚报和误报。同时,TST提供掌子面

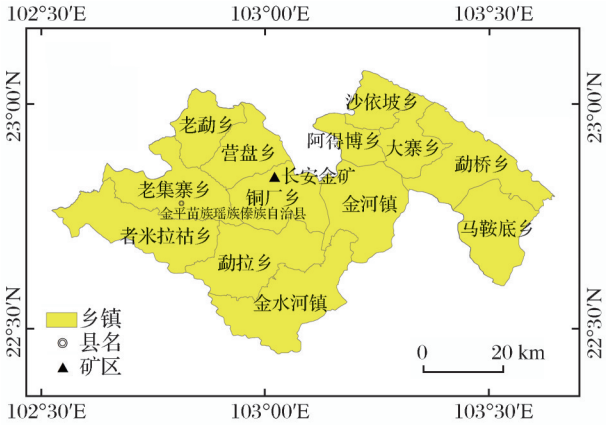


图1　长安金矿地理位置图

Fig. 1　Geographical location map of Chang'an gold mine

前方围岩的岩体波速图像和地质偏移图像。其中,岩体波速为岩体的工程类别划分提供依据,地质偏移图像用于地质构造解释。当地震波遇到岩石波阻抗差异界面(如断层、破碎带和岩性变化等)时,一部分地震波信号反射回来,一部分信号透射进入前方介质。反射的地震波信号将被高灵敏度的隧道专用检波器接收。数据通过TST地震波软件处理,便可预报隧道掌子面前方不良地质体的性质(软弱带、破碎带和断层等构造)、位置及规模(董陇军等,2023)。

该方法适配本矿区近EW向和近SN向复杂构造,可识别5 m以上大型断层至0.5 m以下微小裂隙,轻量化震源适配井下狭小空间及露天转地下多工况,抗高导介质干扰能力强,可实现大于100 m深部探测,还能通过波速衰减反演岩体风化程度,为地质灾害防控提供补充数据。但该方法对含水介质的水文参数量化精度不足,受岩体不均匀性影响可能漏判低缓构造,深度超过500 m区域分辨率降至1.5~2.0 m,且数据反演难度大、对操作人员专业素养要求高,需与其他方法协同优化。

(1)测线布置

地震波接收孔8个,S1~S8布置在隧道两侧边墙,每侧布置4个。检波器孔位间距为2.0 m,孔深为1.5 m,距离地面高度为1.0~1.5 m。检波器采用隧道专用检波器(3分量)。

冲击震源点位8处,P1~P8分别位于隧道两侧边墙,每侧各4个。第一行震源孔P1和P2距离检波器S1和S8的距离为2.0 m,其他震源孔间距为8.0 m,距离地面1.0~1.5 m。

检波器孔采用手风钻成孔,钻头直径为φ50 mm。隧道专用检波器采用炮泥与孔内围岩耦合,并将孔口封堵隔绝噪声影响。现场震源由P1~P8顺序逐点激发,并采集数据。观测系统示意图如图2所示。本次探测中各检波器孔和震源孔的桩号坐标位置见表1。

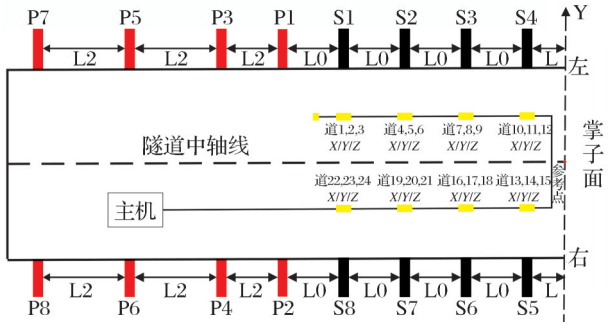


图2　TST检波器及震源孔位置图

Fig. 2　TST detector and source hole location map

(2)数据处理

外业工作结束后随即转入室内资料整理及解释工作,对当天采集数据进行分析、整理并检查复核,然后转入数据处理。地震波的资料处理流程划分为5个步骤,包括观测几何系统编辑、资料预处理、方向滤波与波场分离、围岩波速分布扫描分析以及地质构造偏移成像和地质解释预报等环节,处理流程如图3所示。

2.2　复频电导测超前探水法(CFC)

本次超前探水采用CFC(Complex Frequency Conductivity)探测系统,这是一种电磁波探水技术(侯景方等,2019)。岩体是具有电导率和电容率的复频电导介质,岩体含水后复频电导率增大,本征阻抗降低。电磁波遇到本征阻抗变化的界面就会发生反射。通过使用100 kHz~10 MHz中频段的电磁波,根据反射与相干原理,实现掌子面前方围岩含水位置和含水量的预报。CFC复频电导超前探水系统采用偶极子天线发射与阵列接收。电极长度为1.5~2.0 m,埋设于两侧围岩中,可有效地避免隧道内金属机具等电磁干扰。电极间距为4~10 m,采用4~5对电极阵列接收,具有方向性,使掌子面前方的信号得到加强,侧向的信号被削弱。所有接收点的反射数据联合成像,获得掌子面前方围岩含

表1 TST检波器及震源孔坐标位置

Table 1 TST detector and source hole coordinate position

名称	类型	相对参考点/m				坐标/m		
		距离	孔深	高度	里程	*X*	*Y*	*Z*
P1	激发	13.200	1.800	1.500	187	−13.200	3.750	1.500
P2	激发	14.800	1.800	1.500	185	−14.800	−3.750	1.500
P3	激发	21.200	1.800	1.500	179	−21.200	3.750	1.500
P4	激发	22.800	1.800	1.500	177	−22.800	−3.750	1.500
P5	激发	29.200	1.800	1.500	171	−29.200	3.750	1.500
P6	激发	30.800	1.800	1.500	169	−30.800	−3.750	1.500
S1	接收	11.200	1.800	1.500	169	−11.200	3.750	1.500
S2	接收	9.200	1.800	1.500	191	−9.200	3.750	1.500
S3	接收	7.200	1.800	1.500	193	−7.200	3.750	1.500
S4	接收	5.200	1.800	1.500	195	−5.800	3.750	1.500
S5	接收	6.800	1.800	1.500	193	−6.800	−3.750	1.500
S6	接收	8.800	1.800	1.500	191	−8.800	−3.750	1.500
名称	类型	相对参考点/m				坐标/m		
		距离	孔深	高度	里程	*X*	*Y*	*Z*
P1	激发	12.200	1.800	1.500	156	−12.000	3.450	1.500
P2	激发	12.000	1.800	1.500	156	−12.000	−3.450	1.500
P3	激发	20.000	1.800	1.500	148	−20.000	3.450	1.500
P4	激发	20.000	1.800	1.500	148	−20.000	−3.450	1.500
P5	激发	28.000	1.800	1.500	140	−28.000	3.450	1.500
P6	激发	28.800	1.800	1.500	140	−28.000	−3.450	1.500
S1	接收	10.000	1.800	1.500	158	−10.000	3.450	1.500
S2	接收	8.000	1.800	1.500	160	−8.000	3.450	1.500
S3	接收	6.000	1.800	1.500	162	−6.000	3.450	1.500
S4	接收	4.000	1.800	1.500	164	−4.000	3.450	1.500
S5	接收	4.000	1.800	1.500	164	−4.000	−3.450	1.500
S6	接收	6.000	1.800	1.500	162	−6.000	−3.450	1.500
名称	类型	相对参考点/m				坐标/m		
		距离	孔深	高度	里程	*X*	*Y*	*Z*
P1	激发	12.400	1.800	1.500	150	−12.400	3.450	1.500
P2	激发	11.200	1.800	1.500	153	−11.200	−3.450	1.500
P3	激发	20.400	1.800	1.500	144	−20.400	3.450	1.500
P4	激发	19.200	1.800	1.500	145	−19.200	−3.450	1.500
S1	接收	10.400	1.800	1.500	154	−10.400	3.450	1.500
S2	接收	8.400	1.800	1.500	156	−8.400	3.450	1.500
S3	接收	6.400	1.800	1.500	158	−6.400	3.450	1.500
S4	接收	4.400	1.800	1.500	160	−4.400	3.450	1.500
S5	接收	3.200	1.800	1.500	161	−3.200	−3.450	1.500
S6	接收	5.200	1.800	1.500	159	−5.200	−3.450	1.500
S7	接收	7.200	1.800	1.500	157	−7.200	−3.450	1.500
S8	接收	9.200	1.800	1.500	155	−9.200	−3.450	1.500

水岩体位置与含水量的分布，并计算电磁波速和介电常数，作为含水性预报的依据。

该方法适配本矿区高导介质探测，可精准识别含水破碎带、金属矿脉并量化电导率异常，敏感捕捉含水量变化以反推地下水径流路径，锚杆电极抗干扰能力强，适配露天转地下复杂工况，探测成本低且高效，适配矿区地形和风化特征；但该方法对构造形态识别精度不足，高导矿脉与含水介质叠加时易出现多解性，深度超过100 m区域分辨率下降，且风化岩体高背景电导率可能掩盖小型异常，需结合其他方法并优化数据处理。

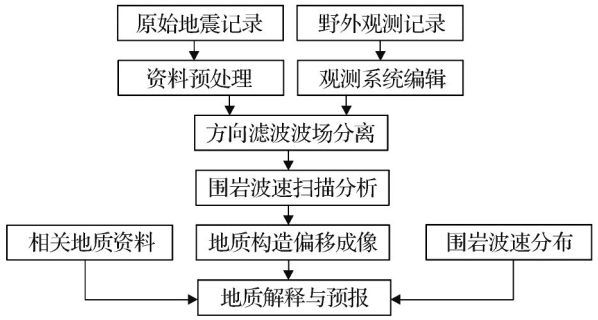


图3 TST数据处理流程图

Fig.3 Flowchart of TST data processing

（1）测线布置

本次CFC数据采集采用如下观测方案：布置电极12根（6组），布置在隧道两侧边墙，每侧布置6根。电极间距*D*=5.0 m，离地面高度约为1.5 m。观测系统如图4所示。

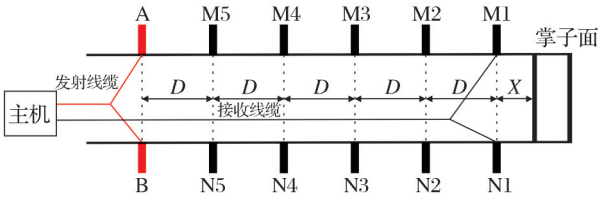


图4 CFC电极位置图

Fig. 4 Position diagram of CFC electrode

（2）数据处理

外业工作结束后随即转入室内资料整理及解释工作，对当天采集数据进行分析、整理并检查复核，然后转入数据处理。CFC资料处理流程经过记录选取、数据预处理、观测系统几何位置编辑、频谱归一化、CFC电磁波速扫描和CFC合成孔径偏移成像计算等过程。处理流程如图5所示。

综上所述，TST与CFC方法在本矿区应用中具有互补性，TST侧重复杂构造的空间定位，CFC侧重高导介质与水文异常的量化识别，通过二者协同，

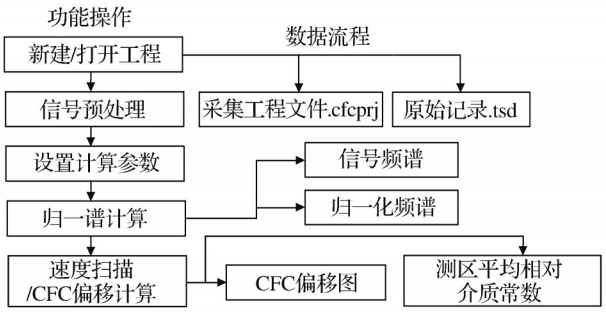


图5　CFC数据处理流程图

Fig. 5　Flowchart of CFC data processing

可有效规避单一方法的局限性,提升矿区复杂构造、高导介质场景下的探测精度和科学性(表2)。

2.3　岩石的原位波速与岩体工程分类波速的关系

隧道超前预报中获得的围岩波速为未开挖岩体的原位弹性波速V_{pr},在围压条件下波速值较高。各种岩土规范中作为围岩工程分类的波速是岩块卸荷后的波速V_{pm}。实际工程中早已发现二者之间存在较大的差异,二者的关系用完整性系数表征:

$$K=\frac{V_{pm}^2}{V_{pr}^2}$$

完整性系数取值范围:$0.15\leqslant K\leqslant 0.75$或$V_{pm}=\sqrt{kV_{pr}}\approx(0.4-0.8)V_{pr}$。即岩体工程分类中的波速值比超前探测得到的波速值低,在0.4~0.8倍,取决于岩体的完整性。

表2　TST与CFC在金属矿山复杂条件下探测技术核心特征对比

Table 2　Comparison of core characteristics of detection technologies for TST and CFC in complex conditions of metal mines

对比维度	地震波法(TST)	复频电导超前探水法(CFC)
核心探测目标	不良地质体(断层、破碎带、裂隙)的空间位置、规模及岩体完整性	围岩含水性、地下水分布及水害风险等级,量化电导率与含水量相关参数
探测精度(构造/含水)	构造定位精度为±1.5 m,可识别0.5 m以上微小裂隙。对含水性仅能定性判断	含水区域定位精度为±2.0 m,可量化相对介电常数(误差≤8%)。对构造形态仅能间接推断
有效探测深度	掌子面前方超过100 m,深度超过500 m,分辨率降至1.5~2.0 m	掌子面前方80~100 m,深度超过100 m,因电磁衰减分辨率显著下降
复杂构造适配性	适配中高倾角(≥15°)构造,对近EW向、近SN向构造识别灵敏度高。低缓构造(<15°)易漏判	对构造类型无明确适配偏好,但无法区分构造破碎带与高导矿脉,易出现多解性
主要干扰因素	岩体不均匀性、井下狭小空间导致的震源—检波器耦合偏差、高频波能量衰减	隧道内金属机具电磁干扰、风化岩体高背景电导率、硫化物矿脉信号屏蔽
适用场景	硬岩矿山、复杂构造集中区、深部探测(≤500 m)、岩体完整性评价	裂隙含水系统、水害风险预判、露天转地下多工况、近浅部(≤100 m)含水性量化

3　预报成果及解释依据

3.1　地震波法(TST)预报成果

(1)预报成果图

采集到的原始数据资料在经过解码计算、资料预处理、方向滤波与波场分离、围岩波速分布扫描分析以及地质构造偏移成像,进而得到地质的偏移成像结果:矿段1 450 m回风平巷如图6所示,1 350~1 300 m斜坡道如图7所示,1 350 m中段平巷如图8所示,包括掌子面前方100 m内围岩的地质偏移图(上)和围岩波速分布图(下)。

(2)解释依据

TST超前预报软件的处理结果图包括地质偏移图和围岩速度分布图,还需要结合地质资料进行地质解释。地质偏移图横坐标是巷道里程,纵坐标是巷道横向宽度,以巷道中心线为零点,预报误差不超过10%。围岩速度分布图横坐标是巷道里程,纵坐标为围岩速度值。地质解释要点如下:使用TST超前预测软件得到地质偏移图和围岩速度分布图,还需结合地质资料,才能对其进行地质解释。地质偏移图横坐标为巷道里程,纵坐标为巷道的横向宽度,取道路中线为零点,预测误差在10%以内。围岩波速分布图横坐标为巷道里程,纵坐标为围岩速度值。地质解释的重点包括:

①地质偏移图红蓝条带对应围岩反射界面:红带为岩体软至硬界面,蓝带为硬至软界面,先蓝后

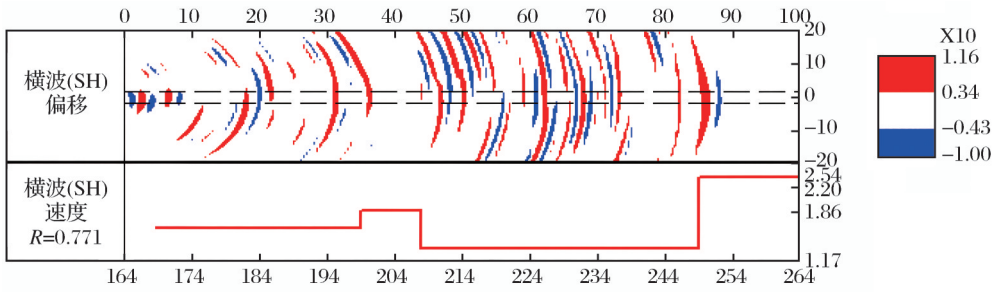


图6　1 450 m回风平巷地质偏移图和波速分布图

Fig. 6　Geological offset and wave velocity distribution diagram of 1 450 m return air flat roadway

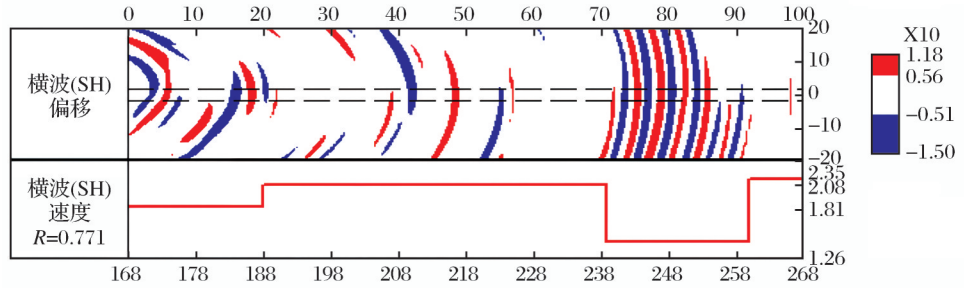


图7　1 350~1 300 m斜坡道地质偏移图和波速分布图

Fig. 7　Geological offset and wave velocity distribution diagram of the 1 350~1 300 m ramp

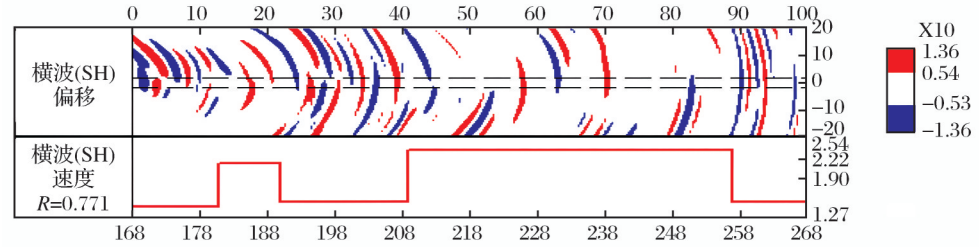


图8　1 350 m中段平巷地质偏移图和波速分布图

Fig. 8　Geological offset and wave velocity distribution diagram of 1 350 m middle section flat roadway

红组合表示可能存在断裂等构造。

②速度扫描得到的围岩波速反映岩体未开挖时的力学性状。波速高则岩体完整致密、弹性模量大，波速低则松散破碎、弹性模量小，断裂区域波速会降低。

③断裂预报需满足2个条件：一是偏移图有先蓝后红条带组合；二是对应里程围岩波速低于两侧。

④围岩含水性预报先查水文资料：巷道在地下水位线以上为季节性含水，且水量有限，在地下水位线以下断裂带一般都含水；泥岩含水量低，砂岩和灰岩含水量较高，泥岩与其他岩接触带常为富水带。

⑤岩溶预报需综合判断：偏移图有蓝色反射界面，围岩速度图有低速带，参考相关地质资料，判断是否有断裂带、灰岩与泥岩、砂岩接触带，在此岩溶发育可能性极大。

⑥2个图像对应性好：地质偏移图反射条纹密集处（结构复杂），速度图为低波速带；条纹稀疏处（围岩均匀致密），速度图为高波速带。

3.2　复频电导测超前探水法（CFC）预报成果

（1）预报成果图

处理结果得到长安金矿长安矿段1 450 m回风平巷、1 350~1 300 m斜坡道和1 350 m中段平巷CFC偏移图掌子面前方100 m围岩含水结构的CFC偏移图像，如图9~图11所示。

(2)解释依据

CFC复频电导超前探水系统的结果图为偏移图,还需要结合地质资料进行地质解释。偏移图中巷道中心线为零点,横坐标为巷道里程,纵坐标为横向宽度。地质解释要点如下:

①偏移图中红色、黄色条纹表示电磁波相干能量强,反射波强,含水量大的界面,绿色含水量次之,蓝色含水量最少。

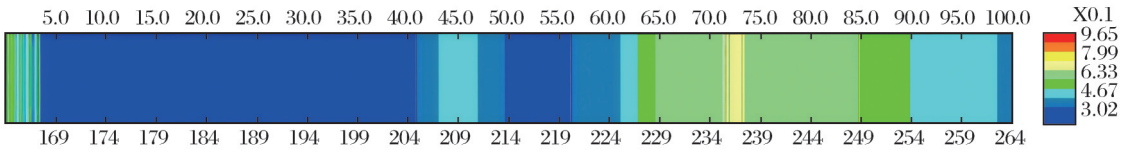


图9　1 450 m中段回风平巷CFC偏移图

Fig. 9　CFC offset diagram of the return air flat roadway in the 1 450 m middle section

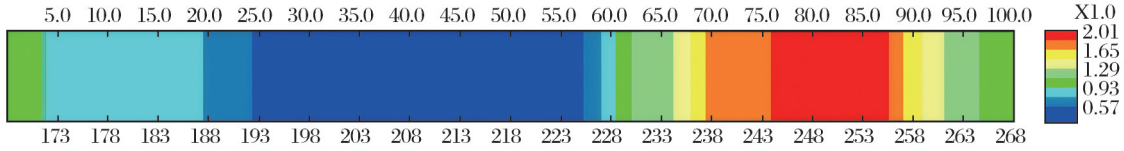


图10　1 350~1 300 m斜坡道CFC偏移图

Fig. 10　CFC offset diagran of the 1 350~1 300 m ramp

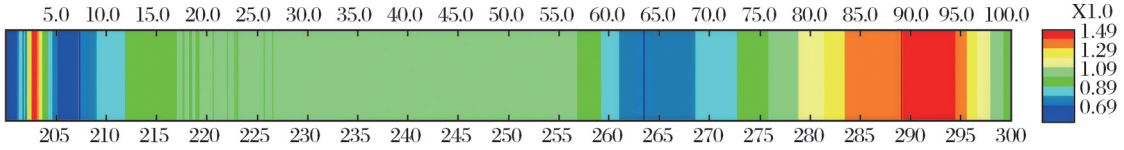


图11　1 350 m中段平巷CFC偏移图

Fig. 11　CFC offset diagran of the flat roadway in the 1 350 m middle section

②计算出的平均电磁波速和平均相对介电常数反映预报全区域内的围岩平均含水状态。电磁波速越高,相对介电常数越低,说明掌子面前方围岩整体含水量小。反之电磁波速越低,相对介电常数越高,说明掌子面前方围岩整体含水量大。

4　预报成果分析

4.1　1 450 m回风平巷综合成果分析

1 450 m回风平巷掌子面现场情况为掌子面和围岩裂隙发育,围岩岩体破碎,掌子面有滴水流现象。根据地质构造偏移图(图6和图9),反映在巷道里程209~239 m段出现红蓝条纹多,说明反射界面多,推断小型构造发育,存在密集节理带,裂隙发育,岩石破碎,围岩完整性和稳定性差,其他段出现的红蓝条纹较少,说明反射界面较少,推断其他段围岩以节理裂隙发育或软硬岩交替为主。CFC偏移图在228.0~254.8 m段以绿色条带为主,235 m处出现黄色条带,反射波强,推断228.0~254.8 m段地下水较多,可能出现滴水、线状流水,235 m处可能出现股状流水,分析成果如表3所示。

4.2　1 350~1 300 m斜坡道综合成果分析

1 350~1 300 m斜坡道现场情况为掌子面破碎,掌子面有流水现象,附近未发现明显断裂。岩性为南板河组第一段浅灰—灰白色石英砂岩和石英粗砂岩。根据地质构造偏移图(图7和图10),反映在168~188 m和238~260 m段出现的红蓝条纹数量多,尤其在238~260 m段出现的红蓝条纹数量最多,说明反射界面多,结合地质资料推断168~188 m段为发育的节理裂隙和小型构造引起,238~260 m段为侵入的正长岩、辉绿岩及岩体破碎引起。其他段出现的红蓝条纹较少,说明反射界面较少,推断其他段围岩节理裂隙弱发育或以软硬岩交替为主,分析成果如表4所示。

4.3　1 350 m中段平巷综合成果分析

1 350 m中段现场掌子面及围岩较破碎,有滴

水流现象。根据地质构造偏移图(图8和图11),反映在200~212 m和222~240 m段红蓝条纹多,说明反射界面多,推断小型构造发育,存在密集节理带,裂隙发育,岩石破碎,围岩完整性和稳定性差,其他段出现的红蓝条纹较少,说明反射界面较少,推断其他段围岩以节理裂隙发育或软硬岩交替为主。CFC偏移图在200~205 m段出现红色条带,200~205 m段出现红色条带,反射波强,推断200~205 m和200~205 m段地下水多,可能出现线状、股状流水,分析成果如表5所示。

表3 长安金矿长安矿段1 450 m回风平巷工程地质构造分段

Table 3 Engineering geological structure segmentation of 1 450 m return air flat roadway in Chang'an section of the Chang'an gold mine

距离/m	里程	TST预报结果		CFC预报结果	预报结论
		纵波波速/(m·s^{-1})	偏移图	平均相对介电常数:6.015	
0~20	168~188	*V*sh=2 400 m/s该段围岩波速低,说明强度低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹多且杂乱密集。说明小型构造发育	CFC图像为绿色条带和青色条纹,反射波强,地下水以线状流水和股状流水为主。地下水以围岩裂隙水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象	该段围岩强度较低,推断岩性主要为中风化—微风化石英砂岩,但小型构造发育,存在密集节理带,岩体较破碎,围岩完整性和稳定性较差。地下水主要为基岩裂隙水,地下水多,以线状流水和股状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象
20~70	188~238	*V*sh=2 700 m/s该段围岩波较高,说明强度较高	该段围岩偏移图像中红蓝条纹较少,说明构造弱发育	CFC图像在里程188.6~225.6 m为深蓝色条带,反射波较弱,推断此段围岩整体地下水少,以潮湿、滴水为主,在里程225.6~238.6 m出现绿色、黄色条带线,反射波强,推断地下水以线状流水和股状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象	该段围岩强度较高,推断岩性为微风化石英砂岩,节理裂隙弱发育,岩体完整,围岩完整性和稳定性好。在里程225.6~238.6 m段地下水含量较多,以线状流水为主,当岩石裂隙连通性较好时,可能出现涌水现象
70~92	238~260	*V*sh=1 900 m/s该段围岩波速低,说明强度低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹多,说明构造发育	CFC图像以红色为主,反射波强,推断此段围岩整体地下水量多,以股状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象	该段围岩强度低,推断岩性为中风化—微风化石英砂岩、正长石和辉绿岩,构造发育,岩体破碎,围岩完整性和稳定性差。地下水多,以股状流水为主,可能存在地下水汇聚,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象
92~100	260~268	*V*sh=2 790 m/s该段围岩波速高,说明强度高	该段围岩偏移图像中红蓝条纹少,说明构造弱发育	CFC图像以绿为主,反射波强,推断地下水以线状流水和股状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象	该段围岩强度高,推断岩性为微风化石英砂岩节理裂隙弱发育,岩体完整,围岩完整性和稳定性好。地下水多,以线状流水和股状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象

4.4 讨论

(1)针对1 450 m回风平巷,TST探测成果显示209~249 m段围岩波速偏低、红蓝反射条纹密集,判定该段小型构造发育、岩体破碎且稳定性差,同时CFC探测发现228~254 m段以绿色条带为主,235 m处出现黄色高反射条带,推断该区域地下水集中且存在股状流水风险,因此需精准强化该区域防排水管控,对235 m附近潜在股状流水区域布设专项排水设施、加密流量观测频次。针对209~249 m段不良地质段优化支护方案,采用"锚网喷+钢架"联合永久支护并加密锚杆,提升破碎围岩稳定性(刘凯,2023)。施工中采用"短掘短支或超前注浆"模式控制掘进进尺,安排专人观察岩体状态防范掉块和冒顶等风险,同时完善动态监测体系,在该不良地质段安装位移监测点并按日监测,确保围岩变形可控(董陇军等,2025)。

(2)针对1 350~1 300 m斜坡道,TST探测识别出168~188 m和238~260 m段围岩波速低、构造发育,为不良地质集中区域,且CFC探测显示168~188 m和228~264 m段含水异常,尤其244~254 m段存在股状流水和突涌水风险,因此需对该类水文异常段实施超前探放水措施并预埋导水管,针对244~254 m潜在突涌水段施工超前探放水孔并储备应急排水泵;同时强化168~188 m和238~258 m不

表4　长安金矿长安矿段1 350~1 300 m斜坡道工程地质构造分段

Table 4　Engineering geological structure segmentation of the 1 350~1 300 m slope road in the Chang'an section of the Chang'an gold mine

距离/m	里程	TST预报结果		CFC预报结果	预报结论
		纵波波速/(m·s^{-1})	偏移图	平均相对介电常数:2.114	
0~30	164~199	*V*sh=2 140 m/s 该段围岩波速低,说明强度低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹较多,说明构造较发育	CFC图像以深蓝色为主,反射波弱,推断此段围岩整体地下水量少,以潮湿、滴水为主	该段围岩强度低,推断岩性主要为微风化砂岩,围岩构造较发育,岩体破碎,围岩完整性和稳定性较差。地下水少,岩体以潮湿、滴水为主
35~45	199~209	*V*sh=2 460 m/s 该段围岩波较高,说明强度较高	该段围岩偏移图像中红蓝条纹少,说明构造弱发育	CFC图像以深蓝色为主,反射波弱,推断此段围岩整体地下水量少,以潮湿、滴水为主	该段围岩强度较高,推断岩性为微风化白云岩和灰岩,节理裂隙弱发育,岩体较完整,围岩完整性和稳定性较好。地下水少,岩体以潮湿、滴水为主
45~85	209~249	*V*sh=1 780 m/s 该段围岩波速低,说明强度低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹多,说明构造发育	CFC图像以绿色为主,反射波强,推断地下水以滴水、线状流水为主,在235 m处出现黄色条带,可能出现股状流水,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象	该段围岩强度低,推断岩性为中风化—微风化白云岩和灰岩,构造发育,岩体破碎,围岩完整性和稳定性差。地下水较多,以滴水、线状流水为主,235 m处可能存在地下水汇聚,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象
85~100	249~264	*V*sh=3 040 m/s 该段围岩波速高,说明强度高	该段围岩偏移图像中红蓝条纹少,说明构造弱发育	CFC图像以绿色和青色为主,反射波较强,推断此段围岩整体地下水量较多,以滴水、线状流水为主	该段围岩强度高,推断岩性为微风化白云岩和灰岩,节理裂隙弱发育,岩体完整,围岩完整性和稳定性好。地下水较多,岩体以滴水、线状流水为主

良地质段支护,采用"拱形钢支架+锚网喷"复合支护并缩小支架间距,适配岩体破碎的地质特征。施工中在低洼处设置临时集水仓与自动抽排水系统,专人定时检查排水设备(王伟霞,2019)。后续掘进前补充CFC复频电导探测,进一步验证地质情况以优化施工方案。

(3)针对1 350 m中段平巷,TST探测确定200~212 m、220~240 m和285~300 m为3处不良地质体,均表现为围岩波速低、构造发育且岩体破碎。CFC探测显示该巷道整体含水丰富,202~205 m和275~295 m段出现红色高反射条带,存在股状流水和高突水风险,215~255 m段以滴水和线状流水为主,因此需前置深部疏干排水工作,对202~205 m和275~295 m等地下水集中段施工疏干钻孔,为潜在股状流水段建设永久排水廊道。根据200~212 m、220~240 m和285~300 m这3处不良地质体的破碎程度差异化实施支护,破碎严重段采用"钢架+锚网喷+混凝土衬砌"支护,其余段采用锚网喷支护,适配不同破碎程度的岩体特征。定期开展专项巡查并在不良地质段布设应力监测点,实时把控支护结构与围岩应力情况(尹玉静,2022)。同时,针对探测识别出的高突水风险完善专项应急处置预案,定期开展应急演练,以提升突发情况防控应对能力。

(4)探测误差、方法局限与水文地质适配性综合分析:本次TST-CFC协同探测整体误差控制在10%以内,局部偏差主要源于岩体非均质导致的波场畸变、井下空间限制观测系统布设、数据处理模型与实际地质条件的差异,可通过加密探测点位等进行优化。在方法局限性方面,TST对低缓构造(<15°)和微小裂隙(<0.3 m)识别不足,深度超过500 m时精度下降。CFC难以区分高导矿脉与含水破碎带,干旱区易漏判,二者在岩溶溶洞群和硫化物矿脉密集区适配性较差。在水文地质适配性方面,该协同技术对中高倾角构造、硬岩矿山裂隙含水系统适配性最优,构造定位精度可达±1.5 m,水害预判准确率超90%。但在软岩、强富水或干旱区需针对性调整参数,未来可通过构建"TST-CFC-钻孔验证"三维探测体系和机器学习反演算法等进一步拓展应用边界。

5　实际开挖与预测对比验证

为验证TST-CFC协同探测成果的准确性,本

表5 长安金矿长安矿段1 350 m中段平巷工程地质构造分段

Table 5 Engineering geological structure segmentation of the 1 350 m middle section of the flat roadway in the Chang'an Section of the Chang'an gold mine

距离/m	里程	TST预报结果		CFC预报结果	预报结论
		纵波波速/(m·s^{-1})	偏移图	平均相对介电常数:6.198	
0~12	200~212	*V*sh=1 910 m/s该段围岩波速低,说明强度低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹多,说明构造发育	CFC图像在里程202~205 m出现红色、绿色条带,反射波强,地下水以线状流水和股状流水为主。地下水主要以围岩裂隙水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象	该段围岩强度低,推断岩性主要为中风化—微风化石英砂岩,但小型构造发育,存在密集节理带,岩体破碎,围岩完整性和稳定性差。地下水主要为基岩裂隙水,地下水多,以线状流水、股状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象
12~22	212~222	*V*sh=2 780 m/s该段围岩波速较高,说明强度较高	该段围岩偏移图像中红蓝条纹较多,说明构造较发育	CFC图像绿色为主,反射波较强,推断此段围岩地整体下水量较多,以滴水、线状流水为主,当岩石裂隙连通性较好时,可能出现涌水现象	该段围岩强度较高,推断岩性为微风化石英砂岩。该段围岩构造较发育,岩体较破碎,围岩完整性和稳定性较差。地下水主要为基岩裂隙水,此段围岩地整体下水量较多,以滴水、线状流水为主,当岩石裂隙连通性较好时,可能出现涌水现象
22~40	222~240	*V*sh=2 010 m/s该段围岩波速低,说明强度低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹多,说明构造发育	CFC图像绿色为主,反射波较强,推断此段围岩地整体下水量较多,以滴水、线状流水为主,当岩石裂隙连通性较好时,可能出现涌水现象	该段围岩强度低,推断岩性为中风化—微风化石英砂岩和正长石,构造发育,岩体破碎,围岩完整性和稳定性差。地下水较多,以滴水、线状流水为主,当岩石裂隙发育导通时,可能出现涌水现象
40~90	240~290	*V*sh=3 030 m/s该段围岩波速高,说明强度高	该段围岩偏移图像中红蓝条纹较少,说明构造弱发育	CFC图像在240~278 m段以绿色为主,在278~290 m段以红色主,反射波较强,推断此段围岩地整体下水量多,在240~278 m以滴水、线状流水为主,278~290 m以股状流水为主,岩石裂隙连通性较好时,可能出现涌水现象	该段围岩强度低,推断岩性主要为微风化石英砂岩和正长石,该段围岩构造弱发育,岩体较完整,围岩完整性和稳定性较好。地下水多,在278~290 m段以滴水、线状流水为主,当岩石裂隙连通性较好时,可能出现涌水现象
90~100	290~300	*V*sh=2 010 m/s该段围岩波速较低,说明强度较低	该段围岩偏移图像中红蓝条纹多,说明构造发育	CFC图像以红色、黄色为主,反射波强,推断此段围岩整体地下水量多,以股状流水为主	该段围岩强度低,推断岩性为中风化—微风化石英砂岩和辉绿岩,构造发育,岩体破碎,围岩完整性和稳定性差。地下水多,以股状流水为主,可能出现地下水汇聚现象

研究在1 450 m回风平巷、1 350~1 300 m斜坡道和1 350 m中段平巷各选100 m已探测段进行实际开挖验证,通过对比超前探测预报的不良地质体位置、规模、含水性与实际开挖揭露情况,得到探测精度与吻合度,为技术方法的有效性提供直接依据。

5.1 巷道对比情况

(1)1 450 m回风平巷

超前探测预报:不良地质体1处,判定为小型构造发育的密集节理带,岩体破碎。水害风险集中在228~247 m段,推测以滴水和线状流水为主,235 m附近可能存在股状流水。

实际开挖揭露:实际开挖100 m,对比段为164.76~254.76 m,剩余部分暂未开挖。在217~251 m段揭露密集节理破碎带,长度为34 m,岩体破碎程度、构造发育特征与预报结果较为接近。240~250 m段揭露含水裂隙带,以线状流水为主,245 m处出现局部股状流水,242~246 m处为富水区,该段总体受地下水影响较小。含水范围、水流形态与CFC探测的反射异常区域吻合度达95%(图12和图13)。

(2)1 350~1 300 m斜坡道

超前探测预报:不良地质体2处(168~188 m和238~258 m),分别为节理裂隙发育带、侵入岩与破碎岩体组合带。水害风险集中在228~264 m段,244~254 m段存在突涌水风险。

实际开挖揭露:实际开挖段为192~292 m,192~209 m和242~268 m段揭露节理裂隙发育带,长度为43 m,岩体完整性与预报范围偏差较小。在水害方面,192~209 m段岩体潮湿,局部滴水、渗水,261~278 m处出现股状流水,为富水区,与预报的水害风险区域及水流强度匹配度达93%(图14和图15)。

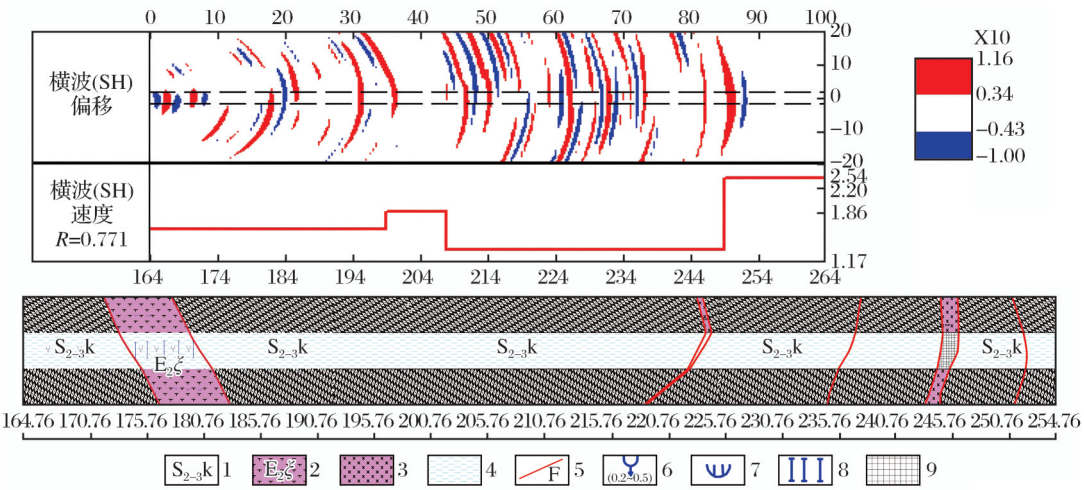


图 12　1 450 m 回风巷 164.76~254.76 m 段 TST 探测成果与实际开挖对比

Fig. 12　Comparison of TST detection results and actual excavation in the 164.76~254.76 m section of the 1 450 m return airway

注:地质偏移图像中的蓝条带代表围岩中的波阻抗较低界面,红色代表岩体由软变硬的反射界面,蓝色代表岩石由硬变软的界面

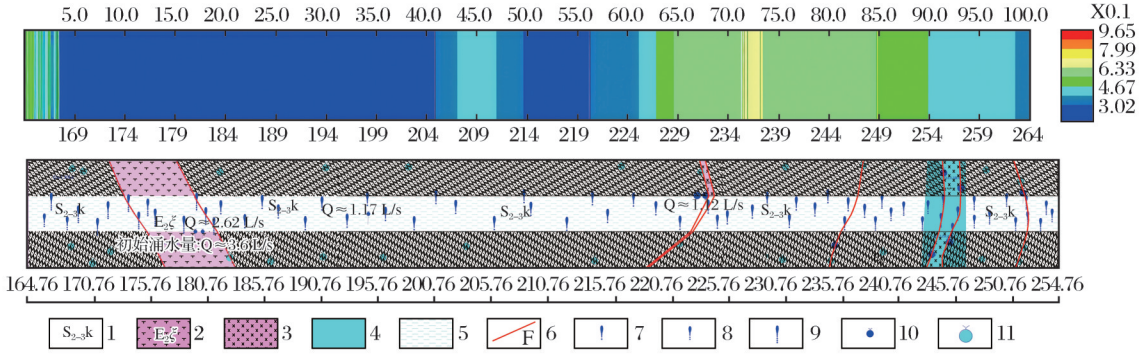


图 13　1 450 m 回风巷 164.76~254.76 m 段 CFC 探测成果与实际开挖对比

Fig. 13　Comparison of CFC detection results and actual excavation in the 164.76~256.76 m section of the 1 450 m return airway

注:偏移图中红色、黄色条纹表示电磁波相干能量强,反射波强,含水量大的界面,绿色含水量次之,蓝色含水量最少

(3)1 350 m 中段平巷

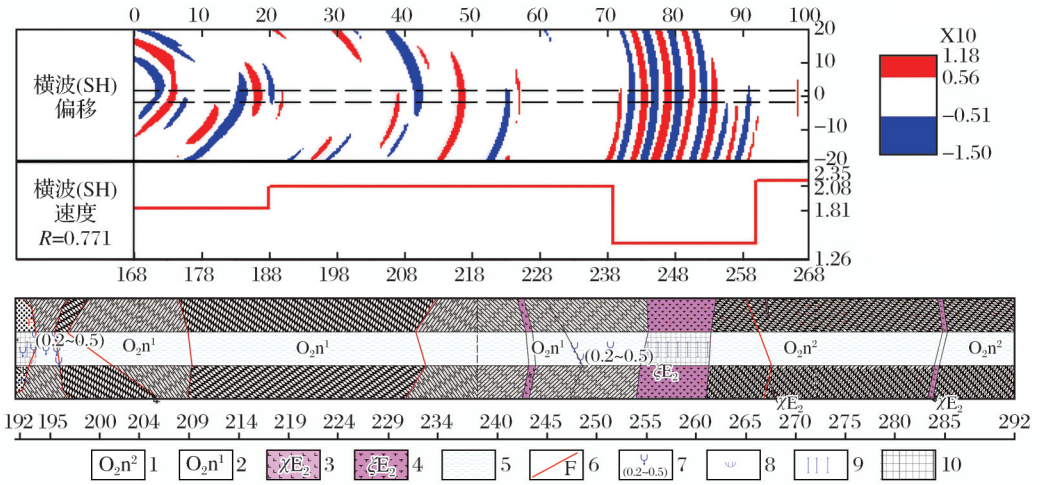
超前探测预报:不良地质体 3 处,均为构造破碎带。水害风险集中在 215~255 m 和 275~295 m 段,其中 275~295 m 段为高突水风险(股状流水)。

实际开挖揭露:201~210 m、222~238 m 和 258~277 m 段分别揭露 3 处构造破碎带,与预报范围偏差较小。在水害方面,219~268 m 段为滴水—线状流水,204~214 m 和 277~296 m 段揭露股状流水带,283~296 m 处为富水区。含水区域、水流强度与 CFC 偏移图的红色、黄色高反射条带区域吻合度达 94%,高突水风险段预测无遗漏(图 16 和图 17)。

5.2　吻合度与偏差分析

构造定位精度:3 条巷道共预报不良地质体 6 处,实际开挖揭露 6 处。构造起始与终止里程平均偏差较小,TST 对复杂构造的空间定位准确率达 95%。

含水性与水害风险预测精度:CFC 对含水性的识别准确率达 90%,水流形态(滴水、线状和股状)

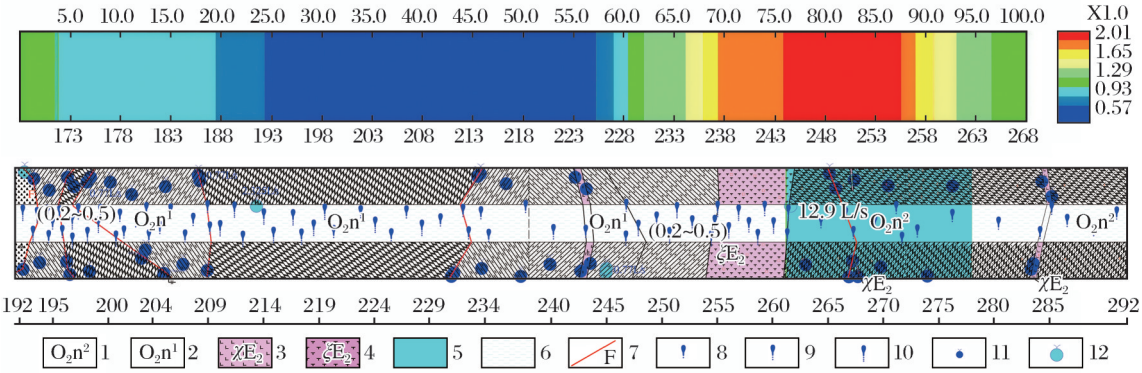


1.中奥陶统南板河组二段;2.中奥陶统南板河组一段;3.煌斑岩;4.正长岩;5.潮湿区;6.次级构造;7.冒顶(掉块)/高度(m);8.片帮处(段);9.钢拱架支护(段);10.挂网支护

图14　1 350~1 300 m斜坡道192~292 m段TST探测成果与实际开挖对比

Fig. 14　Comparison of TST detection results and actual excavation in the 192~292 m section of the 1 350~1 300 m ramp

注:地质偏移图像中的蓝条带代表围岩中的波阻抗较低界面,红色代表岩体由软变硬的反射界面,蓝色代表岩石由硬变软的界面



1.中奥陶统南板河组二段;2.中奥陶统南板河组一段;3.煌斑岩;4.正长岩;5.富水区;6.潮湿区;7.次级构造;8.弱滴水区;9.中等滴水区;10.淋水区;11.渗水区;12.涌水点(区)及流量

图15　1 350~1 300 m斜坡道192~292 m段CFC探测成果与实际开挖对比

Fig. 15　Comparison of CFC detection results and actual excavation in the 192~292 m section of the 1 350~1 300 m ramp

注:偏移图中红色、黄色条纹表示电磁波相干能量强,反射波强,含水量大的界面,绿色含水量次之,蓝色含水量最少

预测吻合度达93%,平均相对介电常数与实际含水量的相关性达0.88。

偏差原因分析:局部偏差主要源于深部岩体不均匀性导致的波场和电磁场轻微畸变,以及小型孤立含水裂隙的反射信号强度不足。此外,地下水是动态分布的,受季节和降雨等因素影响,且实际开挖相对预测时间有一定滞后性,导致结果会有些许偏差,但整体偏差在工程允许范围内,不影响施工决策。

6　结论

本研究聚焦复杂构造金属矿山井下不良地质体和水害,针对传统钻探覆盖有限、易漏判及单一物探方法的局限性,以云南长安金矿作为研究对象,组合TST与CFC技术,对巷道掌子面前方100 m范围超前探测,预测了不良地质体及水害相关特征,构建了适配该类矿山的综合探测技术方案,具有一定理论和现实意义。

(1)工程实践验证了TST-CFC协同探测技术

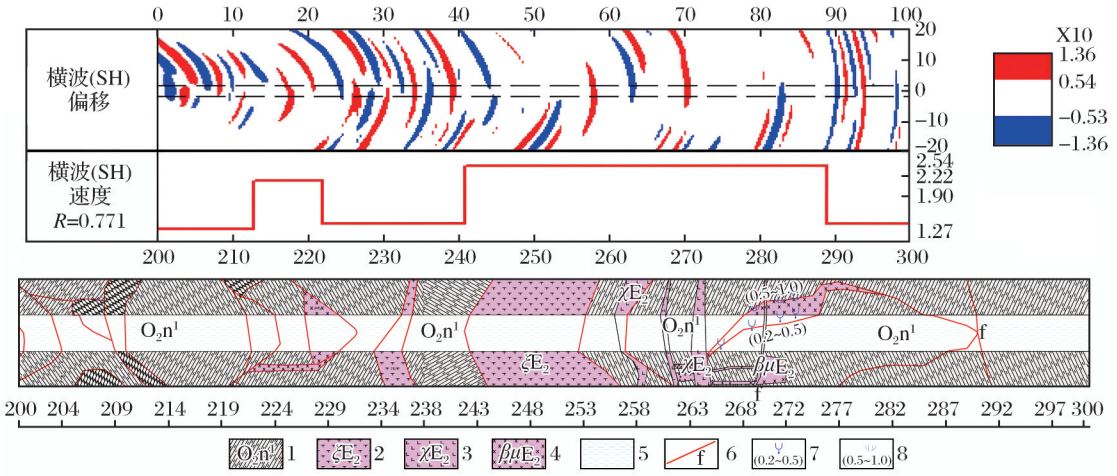


图16　1 350 m中段平巷200~300 m段TST探测成果与实际开挖对比

Fig. 16　Comparative of TST detection results and actual excavation in the 200~300 m segment of 1 350 m middle section flat roadway

注:偏移图中红色、黄色条纹表示电磁波相干能量强,反射波强,含水量大的界面,绿色含水量次之,蓝色含水量最少

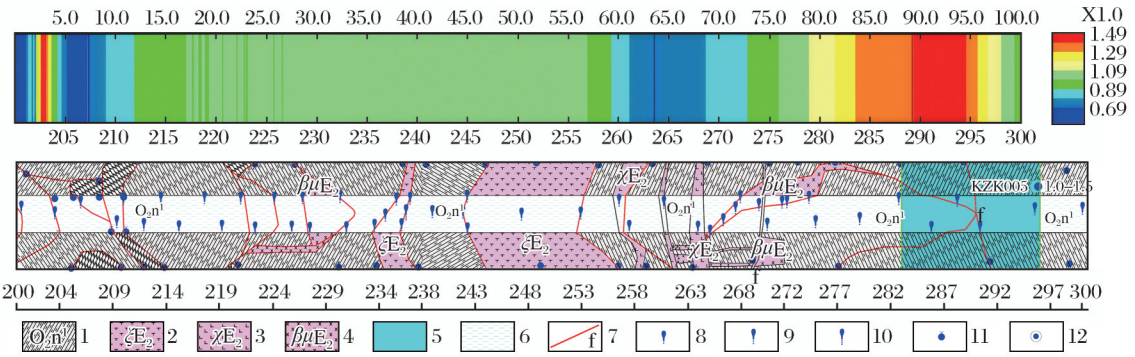


图17　1 350 m中段平巷200~300 m段CFC探测成果与实际开挖对比

Fig. 17　Comparative of TST detection results and actual excavation in the 200~300 m segment of 1 350 m middle section flat roadway

注:偏移图中红色、黄色条纹表示电磁波相干能量强,反射波强,含水量大的界面,绿色含水量次之,蓝色含水量最少

的有效性和适配性。TST可精准识别不良地质体空间位置、规模并评价岩体完整性。CFC可量化围岩含水性并分级预测水害风险,二者功能互补、数据互证,规避单一物探局限,将预报误差控制在10%以内,实现构造与水文异常精准协同探测,从而弥补传统方法的短板。

(2)研究凝练出普适性科学认识与可推广技术成果:一是明确复杂构造金属矿山地质规律,即构造破碎带是岩体稳定性薄弱区和地下水运移富集通道,不良地质体与地下水富集呈空间耦合性,水害风险与岩体破碎程度、围岩含水性呈正相关关系。二是优化形成适配井下狭小空间的TST-CFC观测系统标准化方案,明确实操规范,具备较强的工程可操作性。三是实现"物探解析—风险评价—支护防排水"全流程衔接,确保探测成果指导工程实践。

(3)本研究形成的TST-CFC协同探测技术体系、标准化方案及"探测—评价—防控"闭环方法论,对西南成矿带及同类复杂构造金属矿山具有推广价值,为井下超前地质预报提供标准化路径,提升预警精度和时效性,提供物探技术工程化、规模

化应用典型案例，对保障矿山安全生产和提升矿产资源开发水平具有重要的实践指导意义。

参考文献（References）：

Cui Y, Liu J, Guo Y, et al, 2023.Research progress of resistivity method in nonferrous metal mineral exploration [J].The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 33(1): 223-239.

Fang X, Zhang C, Li C, et al, 2023.Structural design and numerical analysis of an all-metal screw motor for drilling applications in high-temperature and high-pressure environments in ultra-deep wells[J]. Applied Sciences, 13(15): 8630.

Feng Q C, Li C, Hao S R, et al, 2024.Hydrogeological investigation of a goaf and subsidence area based on a ground-to-air transient electromagnetic sounding method[J]. Water, 16(7): 1067.

Jamali F, Amiri A R A, Rouhani A K, et al, 2021. Modeling of induced polarization and resistivity data for prospecting and exploration of polymetallic deposit in Kaboudan Area, East of Iran [J]. Journal of Mining and Environment, 12(3): 693-710.

Li Z, Li S, Du F, et al, 2023.Research on the development law of karst caves on water conducting fractures under the influence of mining in Southwest Karst Mining Areas [J]. Coal Science and Technology, 51(7): 106-17.

Xia R H, Wang H L, Hu T C, et al, 2025.A risk assessment of water inrush in deep mining in metal mines based on the coupling methods of the analytic hierarchy process and entropy weight method: a case study of the Huize lead-zinc mine in northeastern Yunnan, China[J].Water, 17(5): 643.

Zhang Y F, Qian C L, Wang X F, et al, 2023.Study on prevention and control mechanism of runoff water hazard in thick coal seam mining in valley terrain [J]. Frontiers in Earth Science, 11.

董陇军，郝晨良，孙道元，等，2025.矿山顶板灾害地声监测预警与防控[J].采矿与岩层控制工程学报，7(4)：1-27. Dong Longjun, Hao Chenliang, Sun Daoyuan, et al, 2025. Geosound monitoring for early warning prevention control of mine roof hazards[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering, 7(4): 1-27.

董陇军，裴重伟，谢鑫，等，2023.基于多声源波速结构成像的岩体异常区域超前辨识方法[J].Engineering，(3)：191-200. Dong Longjun, Pei Zhongwei, Xie Xin, et al, 2023. Early identification of abnormal regions in rock-mass using traveltime tomography[J].Engineering, (3): 191-200.

樊晓龙，汪爱宝，2017.地质雷达在矿山探测中的应用研究[J].世界有色金属，(16)：132-133.Fan Xiaolong, Wang Aibao, 2017.Application of geological radar in mine detection[J].World Nonferrous Metals, (16): 132-133.

郭美延，丁向南，许新骥，2022.巷道地震波法在金属矿山采空区探测中的应用[J].科学技术与工程，22(23)：10003-10011. Guo Meiyan, Ding Xiangnan, Xu Xinji, 2022. Application of roadway seismic wave method in the detection of goaf in metal mine[J].Science Technology and Engineering, 22(23): 10003-10011.

侯景方，姚琦发，2019.CFC复频电导超前探水技术在深埋隧道的应用[J].工程地球物理学报，16(2)：223-229.Hou Jingfang, Yao Qifa, 2019.Application of complex frequency conductivity advanced water detection technology to a deep-buried tunnel [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 16(2): 223-229.

蒋莉，2021.金属矿产资源经济重要性评估研究[J].世界有色金属，(17)：184-185.Jiang Li, 2021.Study on economic importance evaluation of metal mineral resources [J]. World Nonferrous Metals, (17): 184-185.

敬晓晏，梅恩生，欧任泽，等，2025.超前地质预报在矿山隧道中的应用[J].采矿技术，25(3)：83-88.Jing Xiaoyan, Mei Ensheng, Ou Renze, et al, 2025. Application of advanced geological prediction in mine tunnel [J]. Mining Technology, 25(3): 83-88.

李菊红，孙彦良，2021.矿山工程中地下水地质勘查的重要性研究[J].中国金属通报，(13)：193-194.Li Juhong, Sun Yanliang, 2021. The importance of groundwater geological exploration in mining engineering [J].China Metal Bulletin, (7): 193-194.

李雷，姚琦发，2019.TST与CFC技术在宝林隧洞TBM掘进超前地质预报中的应用[J].城市道桥与防洪，(10)：173-176. Li Lei, Yao Qifa, 2019. Application of TST and CFC technology in geological advanced prediction of TBM tunneling in Baolin tunnel [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, (10): 173-176, 22.

刘凯，2023.综合物探方法在煤矿井下水害防治的应用[J].山西化工，43(2)：108-110.Liu Kai, 2023.Application of comprehensive geophysical prospecting method in prevention and control of underground water hazards in coal mines [J].Shanxi Chemical Industry, 43(2): 108-110.

刘振雄，赵红利，2025.TSP超前地质预报在盾构隧道掘进中的应用研究[J].价值工程，44(28)：124-126.Liu Zhenxiong, Zhao Hongli, 2025. Application research of TSP ad-

vanced geological prediction in shield tunnel excavation [J]. Value Engineering, 44(28): 124-126.

石志峰，2019. 矿产工程地质勘查技术的分析[J]. 世界有色金属，(21)：130-131. Shi Zhifeng, 2019. Analysis of mineral engineering geological exploration technology [J]. World Nonferrous Metals, (21): 130-131.

史进飞，2023. 矿产资源勘查中水文地质工作的重要性研究[J]. 世界有色金属，(13)：124-126. Shi Jinfei, 2023. Research on the importance of hydrogeological work in mineral resource exploration [J]. World Nonferrous Metals, (13): 124-126.

孙祥瑞，2025. 现代化采矿技术在金属矿山开采中的应用研究[J]. 冶金与材料，45(7)：151-153. Sun Xiangrui, 2025. Research on the application of modern mining technology in metal mining [J]. Metallurgy and Materials, 45 (7): 151-153.

王亮亮，2023. 矿区水文地质工程地质环境地质工作内容及技术要求分析[J]. 中国金属通报，(3)：147-149. Wang Liangliang, 2023. Analysis of the content and technical requirements of hydrogeological engineering geological environmental geological work in mining areas [J]. China Metal Bulletin, (3): 147-149.

王伟霞，2019. 井下防治水危险源识别技术研究[J]. 矿业装备，(4)：112-113. Wang Weixia, 2019. Research on identification technology for underground water hazard prevention and control [J]. Mining Equipment, (4): 112-113.

王英，2023. 水文地质工作在矿产资源勘查中的重要性[J]. 世界有色金属，(17)：115-117. Wang Ying, 2023. The importance of hydrogeological work in mineral resource exploration [J]. World Nonferrous Metals, (17): 115-117.

王兆林，2023. TST地震波反射法与地质雷达法隧道超前地质预报综合应用[J]. 福建建材，(8)：27-29. Wang Zhaolin, 2023. Comprehensive application of TST seismic wave reflection method and geological radar method for advanced geological prediction of tunnels [J]. Fujian Building Materials, (8): 27-29.

吴绍咏，2022. 金属非金属矿山安全生产的主要影响因素及管理对策分析[J]. 中国金属通报，(15)：186-188. Wu Shaoyong, 2022. Analysis of the main influencing factors and management strategies for safety production in metal and non-metal mines [J]. China Metal Bulletin, (15): 186-188.

辛未，孟元库，许志河，等，2022. 哀牢山成矿带长安金矿床成因：地质特征、流体包裹体测温和H-O-S-Pb同位素制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，52(5)：1610-1625. Xin Wei, Meng Yuanku, Xu Zhihe, et al, 2022. Genesis of Chang'an gold deposit in Ailaoshan metallogenic belt: constraints from geological characteristic, fluid inclusion thermometer and H-O-S-Pb isotope [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 52(5): 1610-1625.

徐睿知，2025. 物探技术在有色金属矿山勘查中的典型案例分析与应用效能研究[J]. 世界有色金属，(13)：187-189. Xu Ruizhi, 2025. Typical case analysis and application efficiency study of geophysical exploration technology in nonferrous metal mine exploration [J]. World Nonferrous Metals, (13): 187-189.

许敏捷，周宗红，周晓军，等，2021. 长安金矿地下开采巷道分级支护研究[J]. 化工矿物与加工，50(3)：6-9，12. Xu Minjie, Zhou Zonghong, Zhou Xiaojun, et al, 2021. Study on the classified supporting of underground roadway in Chang'an gold mine [J]. Industrial Minerals & Processing, 50(3): 6-9, 12.

薛俊杰，程久龙，韩杨春，2024. 钻孔瞬变电磁法拟地震全波形反演[J]. 地球物理学报，67(9)：3630-3639. Xue Junjie, Cheng Jiulong, Han Yangchun, 2024. Full waveform inversion for the borehole transient electromagnetic pseudo seismic data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(9): 3630-3639.

杨波，谢刘弟，李兴斌，等，2024. 复频电导率探水在煤矿超前预报的试验研究[J]. 煤炭技术，43(9)：119-122. Yang Bo, Xie Liudi, Li Xingbin, et al, 2024. Experimental study on complex frequency conductivity for water exploration in advanced mine prediction [J]. Coal Technology, 43 (9): 119-122.

尹玉静，2022. 金属矿山主要地质灾害类型分析与防治对策研究[J]. 中国金属通报，(4)：210-212. Yin Yujing, 2022. Analysis of main types of geological disasters in metal mines and research on prevention and control countermeasures [J]. China Metal Bulletin, (4): 210-212.

尹哲，2022. 矿山水工环地质调查工作难点及有效措施[J]. 世界有色金属，(7)：124-126. Yin Zhe, 2022. Difficulties and effective measures for mine hydraulic ring geological survey [J]. World Nonferrous Metals, (7): 124-126.

张国栋，刘佳，马凤山，等，2023. 三山岛金矿海底开采井下沉降特点及影响因素浅析[J]. 黄金科学技术，31(5)：785-793. Zhang Guodong, Liu Jia, Ma Fengshan, et al, 2023. Analysis on the characteristics and influencing factors of underground settlement in submarine mining of Sanshandao gold mine [J]. Gold Science and Technology, 31 (5): 785-793.

张秀华，周宗红，丁文俊，等，2023.长安金矿无底柱分段崩落法首采中段损失贫化控制方法[J].有色金属(矿山部分)，75(1)：20-25.Zhang Xiuhua，Zhou Zonghong，Ding Wenjun，et al，2023.Depletion control method for loss in the middle section of first mining by bottomless column segmental crumbling method at Chang'an gold mine[J].Nonferrous Metals(Mine Section)，75(1)：20-25.

赵晓鹏，姚琦发，2020.CFC复频电导法与TEM瞬变电磁法在某隧道中的应用对比[J].城市道桥与防洪，(4)：177-179，195.Zhao Xiaopeng，Yao Qifa，2020.Comparison on application of complex frequency conductance (CFC) method and transient electromagnetic method(TEM) in a tunnel[J].Urban Roads Bridges & Flood Control，(4)：177-179，195.

赵杨杉，郑军，田必林，等，2024.综合物探技术在白云岩矿不良地质体勘查中的应用效果分析[J].矿产勘查，15(增刊2)：69-77.Zhao Yangshan，Zheng Jun，Tian Bilin，et al，2024.Analysis of the application effect of integrated geophysical techniques in the exploration of adverse geological bodies in dolomite mines[J].Mineral Exploration，15(Suppl.2)：69-77.

周癸武，秦正举，李其在，等，2021.云南省金平县长安金矿床地质特征新认识及找矿潜力[J].黄金，42(9)：31-38.Zhou Guiwu，Qin Zhengju，Li Qizai，et al，2021.New perspectives of geological characteristics of Chang'an gold deposit and prospecting potentials in Jinping County of Yunnan Province[J].Gold，42(9)：31-38.

朱习宁，2023.矿山突水灾害影响因素分析及治理措施探讨[J].中国金属通报，(7)：213-215.Zhu Xining，2023.Analysis of influencing factors of mine water inrush disaster and discussion on control measures[J].China Metal Bulletin，(7)：213-215.

Application of Advanced Geophysical Detection Technology in Metal Mines：A Case Study of the Chang'an Gold Mine，Yunnan Province

YANG Wei[1]，HE Xiang[1,2]，LIU Peng[1]，DUAN Xuebin[1]，QIN Hailin[1]，ZHANG Cong[1]

1.*Yunnan Gold Mining Group Co.，Ltd.，Kunming* 650215，*Yunnan*，*China*；

2.*School of Water Resources and Environment，China University of Geosciences (Beijing)，Beijing* 100083，*China*

Abstract：The Yunnan Chang'an gold mine，a significant mining site within the polymetallic mineralization concentration zone of the Ailao Mountains-Honghe orogenic belt in southwestern China，is situated in the southern section of the Jinping anticlinal structure. This site is characterized by a unique geological setting，marked by highly intricate subsurface geological formations. The complex terrain and topography create a variety of spatial conditions conducive to the formation of subsurface adverse geological features and the occurrence and movement of groundwater. Throughout prolonged mining operations，the presence of underground adverse geological formations and water hazards at the Chang'an gold mine has become increasingly prominent. Traditional prevention and control strategies primarily depend on hydrogeological mapping and drilling. However，the drilling process is intricate，time-consuming，and limited to point-based detection，which poses challenges in covering the three-dimensional space ahead of the tunnel. This limitation introduces the risk of "missed judgments"，and drilling in high-pressure areas may also precipitate "borehole-collapse" water disaster incidents. Consequently，these methods no longer satisfy the precision and timeliness demands of contemporary mines for advanced water disaster warning systems. In light of these considerations，this study selects the Chang'an gold mine as a representative case study，concentrating on the implementation of underground geophysical exploration techniques for the identification of adverse geological formations and water-related hazards. The objective is to address the challenges associated with the advanced detection of complex structural metal mineral water hazards and unfavorable geological formations. Initially，the research undertakes a systematic analysis of the underground geological conditions and primary disaster types present at

the Chang'an gold mine. By evaluating the suitability of various geophysical exploration methods, the seismic wave technique (TST) and the advanced water probing method utilizing multiple frequencies (CFC) were identified as the core integrated technologies. Subsequently, given the constrained working environment within the underground tunnels of metal mines, the TST-CFC collaborative observation system was optimized and designed. This involved specifying the parameters for the seismic source, electrode configuration, data acquisition process, and processing standards, ultimately developing a comprehensive technical framework encompassing "data collection - anomaly interpretation-risk warning." The study focused on the 1 450 m return air drift of the Chang'an section, as well as the 1 350~1 300 m slope passage and the 1 350 m middle section flat passage, as the primary subjects for detection. Each project had a forecast distance of 100 meters, culminating in a total of 300 meters of tunnel being completed for advanced detection purposes. Through a combination of on-site data collection, indoor processing, and comprehensive analysis, various forecast results were generated, including geological offset maps, rock wave velocity distribution maps, and CFC offset maps. These results facilitated the precise identification of the location, scale, and water content characteristics of adverse geological formations. Specifically, the 1 450 m return air drift revealed one adverse geological formation, the 1 350~1 300 m slope passage identified two such formations, and the 1 350 m middle section flat passage detected three adverse geological formations. The analysis of water gushing risks across the three tunnels demonstrated a successive upward trend. The TST-CFC collaborative detection technology scheme developed in this study has proven to be precise and efficient in identifying adverse geological formations and water-related hazards in complex structural metal mines, thereby effectively addressing the limitations of traditional detection methods. The findings of this research not only offer a scientific foundation for the Chang'an gold mine to optimize underground construction strategies, enhance disaster prevention and control measures, and improve disaster warning capabilities, but also provide replicable and scalable detection technology references for metal mines with intricate structural characteristics in the southwest region and beyond.

Key words: mineral resources; geophysical exploration technology; disaster warning; Seismic wave method; complex frequency conductance advanced water detection method; Chang'an gold mine; Yunnan Province