

# 莱西山后金矿区深部成矿规律与智慧勘查技术研究

秦荣毅 李建勋 田宇阳

中国冶金地质总局山东正元地质勘查院 山东 潍坊 261021

**摘要：**招平断裂中南段莱西山后金矿区为焦家式蚀变岩型金矿，矿山浅部资源持续消耗，矿体品位较详查数据下降 36%，现有矿量仅支撑 4 年开采，深部控矿规律不清、传统物探深度有限、尾矿伴生资源利用率偏低制约矿山接续生产。本文依托 2021 年 6 孔共 6280.75m 钻探实测资料，系统开展深部成矿、联合物探、智能建模与矿冶协同技术研究。研究表明：工业矿体集中赋存于 F1 断裂下盘 0~150m 黄铁绢英岩蚀变带，-600m 深部包裹体金占比显著升高，基于构造-蚀变-流体三维模型圈定 4 处千米靶区，钻探验证新增推断金金属量 2028.51kg；构建 CSAMT+SIP+ 三维地震 CT 探测体系，最大勘探深度 2200m，钻探见矿率提升 58%；搭建卷积神经网络三维勘探平台，融合多源地质数据消除人工解译偏差，联动井下 5G 设备实现资源动态核算；优化低硫金矿浮选流程同步回收银、铅、锌，配套尾矿充填-有价值组分梯级提取工艺，尾矿综合利用率达 92%。成套技术已在矿区及招平断裂南段矿田推广，区域新增黄金资源超 60 吨，伴生金属回收年增收千万元。该研究推动胶东金矿由经验浅部勘探转向数字化深部精准勘查，完善热液型金矿绿色开发体系，为同类矿山深部增储、低碳开采提供可落地工程方案，保障区域黄金战略资源稳定供给。

**关键词：**招平断裂；山后金矿；深部成矿规律；智能勘查；矿冶协同资源化

**引言：**胶东招平断裂带是我国重要焦家式金矿聚集区，区内老矿山经多年浅部开采普遍面临资源枯竭、品位下降问题，深部找矿、绿色开发迫在眉睫。现有研究虽初步揭示断裂控矿特征，但千米深部矿化分异规律不明，单一物探探测深度有限，传统二维地质解译主观性强，且伴生金属回收、尾矿综合利用缺乏一体化工程技术方案，难以支撑矿山接续生产。莱西山后金矿区位于招平断裂中南段，浅部资源持续消耗，剩余矿量仅可维持 4 年开采，深部隐伏矿体预测、精准勘查、固废资源化等瓶颈突出。本文依托矿区深部钻探实测资料，系统开展深部成矿规律、多手段联合物探、智能三维建模、矿冶协同资源化研究，构建构造-蚀变-流体三维成矿模型，搭建 CSAMT+SIP+ 三维地震 CT 大深度探测体系与卷积神经网络智能勘探平台，优化浮选及尾矿充填梯级提取工艺。经钻探工程验证与区域矿田推广，形成老矿山深部增储、低碳开采成套技术，完善热液型金矿深部成矿理论，为同类蚀变岩金矿勘查开发提供工程借鉴。

## 1 矿区地质概况与开发瓶颈

### 1.1 区域与矿区地质特征

矿区大地构造位置隶属于胶北断隆南翼—云山凸起，地处招平断裂带中南段，区域构造位置优越，成矿地质背景十分有利。矿区基底地层主要由中太古代唐家庄岩群、古元古代荆山群变质岩组成，岩性以变质表壳

岩、片麻岩类为主，构成了矿区稳定的结晶基底。区内主干控矿断裂 F1 沿玲珑序列二长花岗岩与变质岩接触带延伸展布，断裂走向 30°，倾向南东，平均倾角 40°，破碎带宽度稳定在 150~200m，断裂构造发育程度适中，既是区域重要的导矿通道，也是主要的储矿空间，控制了区内金矿体的整体展布规律。

矿区范围内共圈定 16 条金矿体，其中 I-2 为主矿体，资源量占矿区总资源量的 65.5%，赋存标高范围为 +156m~-487m；I-4、II-1 为近年深部勘查新增的次要矿体，埋藏深度普遍超过 600m。矿体整体以板柱状、透镜形态产出，与周边围岩呈渐变接触关系，边界需结合取样化验综合圈定。矿石类型为原生低硫蚀变岩型金矿，金矿物主要为自然金与银金矿，嵌布形式以裂隙金、粒间金为主，占比达 78.22%，矿石可浮性良好；同时伴生银、铅、锌多金属组分，后续选矿可开展综合回收利用，提升资源经济效益。

矿区水文地质、工程地质、环境地质条件均划分为简单类型。所有矿体均位于区域侵蚀基准面之下，构造裂隙含水带富水性偏弱，地下水补给径流条件有限；矿区岩体完整性较好，围岩稳定性高，不存在滑坡、泥石流等重大地质灾害隐患。值得注意的是，矿区深部-600m 以深区域地温可达 31℃，后续井下开采设计阶段需针对性完善通风降温系统，保障深部采掘作业安全。

## 1.2 矿山生产与资源开发瓶颈

山东黄金莱西后山后金矿区 2018 年达产, 采选规模 50 万吨/年, 采用竖井开拓、尾砂胶结充填采矿, 配套千吨级浮选选厂, 选矿金综合回收率稳定 96% 以上, 同步落地国内首批井下 5G 智能电机车、遥控铲运机。资源层面矛盾突出: 详查备案矿石量 423.58 万吨, 经多年开采、中段二次圈定后, 剩余可利用矿石量仅 209.24 万吨, 服务年限不足 4 年; 浅部矿体出现大范围品位负变, 传统二维地质剖面无法预判深部矿体空间展布; 常规直流电法探测深度不足千米, 深部低阻蚀变带、隐伏矿体识别精度低; 选矿尾矿直接堆存占用土地, 伴生金属未规模化回收, 资源利用与生态保护存在短板<sup>[1]</sup>。

## 2 深部成矿规律精细化研究与靶区预测

### 2.1 断裂分段控矿与深部矿化分异机制

本次研究依托矿区 2021 年 6 个深部钻孔累计 6280.75m 的钻探岩心编录与测试分析成果, 系统总结 F1 断裂的分段控矿特征与成矿规律。勘查数据表明, 区内工业矿体空间分布受断裂构造严格约束, 仅赋存于主裂面下盘 0~150m 范围内的黄铁绢英岩强蚀变带内; 主裂面发育的断层泥阻隔成矿热液向上运移, 导致断裂上盘难以形成大规模工业矿化。断裂构造形态对成矿富集控制明显, 舒缓波状转折部位、次级裂隙密集发育区段会形成流体扩容空间, 为成矿物质沉淀富集提供有利场所, 蚀变横向、纵向分带越完整有序, 对应矿体厚度越大、金品位越高, 成矿富集效应越显著。

矿区深部金矿物赋存特征呈现清晰的分异规律: +100m 以浅的矿体受浅部构造活动与温压波动影响, 金矿物以裂隙金、晶隙金为主, 矿物颗粒整体偏粗; -600m 深部构造环境稳定, 热液温压条件持续平稳, 成矿环境相对封闭, 包裹体金占相较浅部大幅提升, 同时矿体厚度起伏幅度变小, 空间连续性明显增强<sup>[1]</sup>。其中 ZK18-1 钻孔揭露 I-2 矿体水平厚度达 51.72m, 是矿区深部厚大矿体的典型实例, 直接印证 F1 断裂深部仍具备良好的成潜力与大规模找矿空间, 为后续深部勘查工程布置提供了扎实的地质依据。

### 2.2 “构造-蚀变-流体”三维成矿预测模型与靶区验证

为精准刻画深部矿体空间分布规律, 本文系统整合多维度地质资料, 涵盖矿区多年 1:10000 实测地质填图成果、39 孔前期详查钻探数据, 以及 2021 年实施的深部全孔钻探岩心、化验、物探等多源信息, 搭

建起构造、蚀变、热液流体要素耦合的三维成矿预测模型。结合断裂控矿、蚀变分异、流体沉淀富集规律综合研判, 最终圈定 4 处埋深超千米的深部重点勘查靶区。

为检验模型预测精度, 2021 年针对靶区布设 6 个验证钻孔, 其中 ZK16-1、ZK18-1、ZK20-1、ZK20-2、ZK34-1 五孔均揭露工业金矿体, 仅 ZK26-1 未见到达标矿化, 整体验证效果良好。本次勘查共新增推断矿石资源量 89.84 万吨, 对应金金属量 2028.51kg, 充分证实该三维耦合成矿模型对深部隐伏矿体的预测具备较高可靠性。本次验证还新发现 II-1、I-4 两条矿体, 分别赋存于断裂上盘与原有主矿体下部, 突破以往仅在主矿体下盘找矿的固有认知, 有效拓宽了矿区深部找矿范围, 为后续持续开展千米深部增储勘查指明方向。

## 3 深部隐伏矿体智慧勘查成套技术

### 3.1 CSAMT+SIP+ 三维地震 CT 高精度联合物探体系

单一电法、激电等传统物探手段分辨能力有限, 难以有效区分深部含水破碎围岩与含金黄铁绢英岩蚀变带, 易形成大量假异常, 造成钻探工程浪费。针对该深部勘查痛点, 本次研究搭建可控源音频大地电磁 (CSAMT) 与激发极化法 (SIP) 联合探测技术方案, 并配套三维地震 CT 完成深部精细构造成像, 形成多方法协同的高精度深部物探体系。

该成套组合探测系统最大有效勘探深度可达 2200m, 能够清晰界定断裂破碎带边界, 精准识别黄铁绢英岩蚀变形成的低阻异常, 同时区分无矿含水破碎带与含矿蚀变带两类电性相近地质体。与矿区以往仅依靠单一直流电法的勘查成果对比, 深部验证钻孔见矿率提升 58%, 显著削减无矿空孔数量, 减少深部钻探无效工程量, 有效控制矿山深部探矿投入, 为千米深部隐伏矿体高效定位提供可靠物探支撑。

### 3.2 卷积神经网络三维智能勘探建模系统

传统地质建模高度依赖工程师经验, 存在构造解译偏差、多源数据融合效率低等问题。本次研发基于卷积神经网络的智能勘探平台, 自动导入重力、电法、钻孔岩心、样品化验数据, 算法自动提取断裂走向、倾角、蚀变带范围等控矿参数, 规避人工主观误差, 完成矿区全域三维数字化地质实体模型搭建。模型可动态更新每年探矿数据, 自动核算不同中段资源储量, 匹配 5G 井下智能开采系统, 实现资源评价、采掘规划一体化数字化

管控。

#### 4 低硫金矿冶一体化绿色高效利用技术

##### 4.1 原生低硫金矿浮选优化分选工艺

矿区矿石为低硫蚀变岩型，硫化物总量低、有害砷组分含量极低，属易选矿石。现有“两段一闭路破碎—一段闭路磨矿—一粗二扫二精浮选”工艺适配矿区矿石特征，磨矿细度-200 目占 60%时，金精矿品位稳定 60g/t，综合回收率维持 96%以上。在原有流程基础上优化药剂配比与浮选充气制度，同步回收矿石中伴生银、铅、锌，实现主金属与伴生有价值组分同步富集。

##### 4.2 尾矿充填与有价值组分梯级提取协同工艺

选矿尾矿经砂仓分级后，粗粒尾砂直接制备胶结充填料输送井下采空区，细粒尾矿开展有价值金属分步浸出回收，形成“井下充填+尾矿资源化”一体化流程。整套工艺使矿区尾矿综合利用率达到 92%，完全取消大面积尾矿堆存用地，减少水土流失与重金属地表扩散；伴生金属回收每年产生千万元级额外产值，同步压缩矿山土地复垦、生态修复资金投入，形成适配胶东地下金矿的可持续开发评价体系。

#### 5 工程应用成效与行业示范价值

本文形成的深部成矿预测方法、大深度联合物探、智能三维建模、尾矿协同利用成套技术已完成山后金矿区全流程落地，并推广至招平断裂南段夏甸、大尹格庄矿田。截至研究总结阶段，技术体系累计带动区域新增黄金资源量超 60 吨，有效延长多座老矿山服务年限；数字化智慧勘查模式替代传统经验找矿，缩短深部探矿周期 30%；矿冶一体化工艺实现固废减量化与资源增值双重效益。

理论层面，完善招平断裂蚀变岩型金矿深浅部矿化分异理论，填补千米深部隐伏矿体精细控矿规律研究空白；工程层面，建立“预测-探测-建模-选冶”全链条技术范式，推动胶东黄金行业勘查开发从粗放浅采向深部精准、绿色低碳转型，对保障国内黄金战略矿产供给、提升金属矿山资源综合利用水平具备重要参考价值<sup>[2]</sup>。

#### 6 结论

(1) 莱西山后金矿区招平断裂下盘 0~150m 黄铁绢英岩蚀变带为核心储矿空间，断裂构造形态、蚀变完整

度、次级裂隙耦合控制矿体富集；深部-600m 以下包裹体金占比升高，厚大隐伏矿体发育潜力充足，三维构造-蚀变-流体预测模型可高效圈定千米深部找矿靶区。

(2) CSAMT+SIP+ 三维地震 CT 联合物探体系最大探测深度突破 2200m，搭配卷积神经网络智能地质建模系统，实现深部隐伏矿体数字化、高精度勘查，显著提升钻探见矿效率。

(3) 适配矿区低硫金矿的浮选工艺可稳定回收金及伴生银、铅、锌；分级尾矿充填-有价值组分梯级提取一体化技术使尾矿综合利用率达 92%，兼顾矿山充填需求与资源绿色增值。

(4) 成套理论与工艺在招平断裂金矿田规模化应用，大幅新增深部黄金资源储量，构建老矿山深部增储、绿色开发一体化模式，可为国内同类型构造蚀变岩型金矿床勘查开发提供完整技术示范。

**结束语：**本文以莱西山后金矿区为研究对象，针对老矿山深部找矿与绿色开发难题，结合大量钻探、物探及选矿试验数据，系统剖析招平断裂深部控矿规律，建立高精度智慧勘查技术体系与尾矿协同利用工艺，形成“预测-探测-建模-选冶”一体化技术范式。成套技术在本矿区落地并推广至招平断裂南段矿田，有效新增深部黄金资源、提升钻探见矿率、实现尾矿 92%综合利用，兼具理论创新与工程实用价值。受客观条件制约，研究仍存在不足：深部流体温压同位素测试样本不足，超千米深部成矿机理有待细化；智能建模算法适配性局限，跨矿田通用模型需持续优化；尾矿有价值组分分离药剂成本与回收效率仍有提升空间。后续将补充深部地质测试数据，融合多矿区样本迭代智能勘查平台，研发低成本绿色提取药剂，进一步完善胶东深部金矿成矿理论与全链条低碳开发技术体系，助力国家黄金战略资源稳定供给与金属矿山绿色转型。

#### 参考文献

- [1] 宋明春，等。胶东招平断裂带金成矿作用与深部找矿[J]. 地质学报，2020.94（10）:2-14.
- [2] 刘昊天，孙丰月，张贵达，等。山东莱西山后金矿床流体包裹体特征[J]. 世界地质，2015，34（2）:372-378.