

胶东半岛郭城金矿深部找矿技术方法及应用效果研究

范朋杰

山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司 山东 烟台 265100

摘要:以胶东郭城金矿为研究对象,剖析矿区区域地质、矿体特征与深部阶梯式成矿控制机制,针对传统勘查深度不足、抗干扰性差等问题,构建融合广域电磁法、重磁联合反演、三维建模的深部综合找矿技术体系。通过工程布设与钻探验证,圈定深部隐伏矿体,新增金金属量5.82t,有效缩减钻探成本、提升勘查精度。同时梳理技术短板,明确矿区深部找矿方向,为胶东同类型断裂带金矿深部勘探提供技术参考。

关键词:胶东半岛郭城金矿;深部找矿;技术方法;应用效果

引言:胶东半岛为我国黄金核心产区,招平断裂带北段郭城金矿浅部资源日渐枯竭,深部隐伏矿体勘探成为资源增储关键。矿区深部地质条件复杂,井下电磁干扰强、传统物探技术探测深度受限,深部成矿规律与高效勘查技术亟待完善。本文结合矿区物性参数与成矿条件,优化适配深部勘查工艺,搭建专属找矿技术体系,开展工程应用验证,探究技术应用成效,助力矿区深部资源挖掘与区域金矿勘查技术升级。

1 研究区地质概况与深部成矿条件分析

1.1 区域地质背景

(1) 胶东半岛大地构造单元划分归属于华北克拉通东南缘之胶辽隆起带,其东侧以郯庐断裂为界与苏鲁造山带相邻,区内进一步划分为胶北隆起、胶莱拗陷和威海隆起等三级构造单元,郭城金矿位于胶北隆起东北缘。(2) 区域地层以新太古代—古元古代变质基底为主,包括胶东岩群、荆山岩群和粉子山岩群的片麻岩、变粒岩及大理岩;岩浆岩分布广泛,以侏罗纪玲珑花岗岩、早白垩世郭家岭花岗岩闪长岩及崂山花岗岩为主,构成近EW向岩基。(3) 区域主干断裂构造以NE—NEE向压扭性断裂为主,自西向东有三山岛断裂、焦家断裂、招平断裂等,控制着胶东地区金矿成矿带的分布,郭城金矿即位于招平断裂带北段东侧次级断裂系统中。

1.2 郭城金矿矿区地质特征

(1) 矿区地层岩性组合以古元古代荆山群变质岩为主,主要岩性为斜长角闪岩、黑云变粒岩和大理岩,呈残留体赋存于花岗岩体中,空间上沿NW向构造带断续分布。(2) 矿区控矿、容矿断裂构造以NE向压扭性断裂为主,其次为NW向张扭性断裂,断裂带内发育碎裂岩、糜棱岩和断层泥,主裂面产状陡倾,倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$,控制着矿体的就位与富集。(3) 矿区岩浆活动频繁,燕山晚期岩浆侵入形成花岗岩主体,后期发育大量中基性—酸性

岩脉,如闪长玢岩、煌斑岩和花岗斑岩,岩脉多沿断裂充填,与金矿化关系密切,常作为成矿前或成矿期标志^[1]。

1.3 矿区矿体地质特征

(1) 浅部已探明矿体主要赋存于NE向断裂带内,呈脉状、透镜状产出,单个矿体长 $50 \sim 300\text{m}$,厚 $0.5 \sim 5\text{m}$,倾向SE,倾角 $55^{\circ} \sim 75^{\circ}$,矿体沿走向和倾向具膨缩、分支复合特征。(2) 矿石物质组分以黄铁矿为主,次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿,脉石矿物为石英、绢云母、长石;矿石结构有自形—半自形粒状结构、交代溶蚀结构,构造以浸染状、细脉状及角砾状为主;金品位一般 $2 \sim 15\text{g/t}$,平均约 6.5g/t ,高品位段可达 30g/t 以上。(3) 围岩蚀变类型包括硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化及绿泥石化,自断裂中心向外依次发育黄铁绢英岩化带→绢英岩化带→青磐岩化带,其中黄铁绢英岩化与金矿化耦合关系最密切,是找矿的直接标志。

1.4 金矿深部成矿控制因素与成矿模式

(1) 构造倾角阶梯带深部控矿机制表现为断裂倾角由陡变缓的转折部位(倾角 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$)构成应力扩容空间,利于含矿热液聚集沉淀,形成厚大富矿体,推测深部存在多级倾角阶梯带控制矿体垂向分段富集。(2) 岩浆热液提供了成矿流体和部分成矿物质,早白垩世郭家岭期花岗闪长岩岩浆热液沿断裂运移,与变质岩地层发生水岩反应,地层中(荆山群)的富金建造为成矿提供了物质来源,岩性界面附近的脆性差异层是矿化的有利围岩。(3) 郭城金矿深部阶梯式成矿模型:以招平断裂带次级NE向断裂为主干控矿构造,在倾角阶梯转换带、岩脉与断裂交汇部位及岩性突变界面处形成“构造—流体—岩性”耦合成矿系统,矿体在垂向上呈阶梯状斜列展布,深部(-500m 以下)仍存在第二、第三成矿台阶,具有较大找矿潜力。

2 胶东半岛郭城金矿深部优选找矿技术体系构建

2.1 深部找矿技术选型依据

(1) 矿区深部地质、物性参数测试分析: 对郭城金矿-300~-800m钻孔岩芯物性测试表明, 黄铁绢英岩化碎裂岩密度 $2.65 \sim 2.75 \text{g/cm}^3$ (低于围岩), 电阻率 $< 500 \Omega \cdot \text{m}$ (围岩 $> 2000 \Omega \cdot \text{m}$), 极化率 $5\% \sim 15\%$ (围岩 $< 2\%$), 为物探技术选型提供了物理前提。(2) 深部勘查干扰因素与传统技术适配性缺陷: 井下排水、电缆及金属轨道产生强电磁干扰, 地表地形切割剧烈。传统直流电法探测深度 $< 500 \text{m}$, 激电法受接地条件限制; 常规磁法易受浅部闪长玢岩脉干扰, 被动源地震信噪比低^[2]。

(3) 技术选型原则与深部勘查目标定位: 遵循“抗干扰、大深度、高分辨率”原则, 优选人工源广域电磁法和重磁联合反演技术, 目标定位在-500~-1200m深度查明控矿断裂倾角阶梯带及隐伏矿体空间位置。

2.2 地质精细勘查技术及工艺优化

(1) 深部构造剖面精细解剖技术: 基于已有钻孔揭露和广域电磁法反演断面, 按1:2000比例尺编制深部构造剖面图, 精细识别断裂带产状变化、分支复合及次级断裂发育特征, 准确锁定倾角由陡变缓的阶梯转换带位置。(2) 蚀变带深部分带甄别技术: 采用短波红外光谱(SWIR)对深部岩芯进行快速扫描, 识别绢云母、绿泥石等蚀变矿物特征峰, 建立黄铁绢英岩化强度指数与金品位关系模型; 配合便携式X荧光分析仪现场测定As、Sb等指示元素, 实现蚀变分带半定量快速甄别。(3) 井下坑道地质编录与矿体延伸预判技术: 对-200m、-350m中段坑道系统编录, 绘制断裂面等高线图、矿化强度等值线图和断层擦痕侧伏角统计图(侧伏角 $50^\circ \sim 60^\circ$), 结合矿体侧伏规律预判深部延伸方向, 指导深部钻孔布设。

2.3 地球物理深部找矿核心技术

(1) 广域电磁法深部断裂探测技术: 采用广域电磁法(WFEM), 发射频率 $0.01 \sim 8192 \text{Hz}$, 收发距 $10 \sim 15 \text{km}$, 最大探测深度 $> 1500 \text{m}$, 抗干扰能力强, 可清晰识别深部低阻异常带形态、产状及倾角变化。(2) 高精度重磁联合反演深部异常圈定技术: 布设高精度重力(精度 $< 0.01 \text{mGal}$)和磁测(精度 $< 1 \text{nT}$), 采用三维联合反演剥离浅部干扰, 圈定低密度($< 2.70 \text{g/cm}^3$)、低磁异常区及花岗岩-变质岩密度突变界面。(3) 伽玛能谱、X荧光物化探辅助勘查技术: 伽玛能谱测量获取Th/U、Th/K比值识别热液蚀变晕; 手持X荧光分析仪现场快速测定As、Sb、Ag、Cu、Pb、Zn含量, 圈定原生晕异常中心, 为深部矿体定位提供快速佐证^[3]。

2.4 综合勘查耦合与三维预测技术

(1) 地-物-化多源勘查数据融合处理方法: 建立多

源数据融合平台, 将地质剖面(断裂、蚀变、岩性)、物探反演体(电阻率、密度、磁化率)和化探原生晕数据网格化($25 \text{m} \times 25 \text{m} \times 25 \text{m}$), 采用证据权重法提取多源异常高叠合区作为靶区。(2) 深部矿体三维地质建模技术流程: 基于钻孔(> 50 个)、坑道编录和广域电磁反演结果, 利用Micromine或LeapfrogGeo构建三维地质模型(含断裂面、岩性界面、蚀变带), 采用普通克里金法生成品位块体模型($5 \text{m} \times 5 \text{m} \times 5 \text{m}$)。(3) 深部成矿有利区定量预测方法: 构建找矿信息指标体系(断裂倾角变化率、黄铁绢英岩化强度、电阻率低阻异常、极化率高异常、元素分带系数5个主控因子), 采用模糊逻辑法计算成矿有利度指数($0 \sim 1$), 按 ≥ 0.7 、 $0.5 \sim 0.7$ 、 < 0.5 划分三级靶区, 预测-600~-1000m深度范围潜在资源量。

3 胶东半岛郭城金矿深部找矿技术工程应用效果与优化对策

3.1 技术方案现场工程实施部署

(1) 深部勘查测线、钻探工程布设方案: 围绕NE向主控矿断裂, 按线距 100m 布设广域电磁法测线8条(总长 24km), 重磁测量覆盖面积 3.5km^2 ; 依据物探异常与倾角阶梯带位置, 部署深部钻孔6个(孔深 $800 \sim 1200 \text{m}$, 总进尺 6200m), 其中验证孔4个、控制孔2个, 同时利用矿区-200m、-350m中段坑道布置坑内钻孔3个(孔深 $300 \sim 500 \text{m}$)。(2) 各类勘查技术现场施工参数管控: 广域电磁法采用伪随机多频信号发射, 发射频率 $0.01 \sim 8192 \text{Hz}$, 发射电流 $\geq 50 \text{A}$, 接收电极距 50m ; 重力测量使用CG-6型重力仪, 闭合精度优于 0.01mGal , 点位平面误差 $< 0.5 \text{m}$; 手持X荧光分析每米岩芯测量1次, 积分时间 60s ^[4]。(3) 深部勘查质量控制措施: 钻孔每 50m 测斜1次, 偏差超过 $2^\circ/100 \text{m}$ 即纠斜; 岩芯采取率 $\geq 85\%$, 矿化段采取率 $\geq 90\%$; 物探数据采集后现场进行带通滤波、去噪及静态校正处理, 剔除工业干扰; 所有原始资料实行三级验收。

3.2 深部找矿成果与矿体圈定效果

(1) 深部物探异常、化探异常解译成果: 广域电磁法反演显示在-600~-950m区间存在连续低阻异常带(电阻率 $150 \sim 350 \Omega \cdot \text{m}$), 形态与断裂倾角由陡变缓部位吻合; 重磁联合反演圈定低密度($2.66 \sim 2.71 \text{g/cm}^3$)、低磁化率($0.02 \sim 0.05 \text{SI}$)异常区2处, 面积约 0.6km^2 ; 原生晕As、Sb、Ag异常叠合良好, 异常衬度 > 3.0 。(2) 深部隐伏矿体空间位置、规模探明结果: ZK5孔在-685~-742m、ZK8孔在-812~-878m及坑内ZK3孔在-520~-558m分别揭露新矿体, 矿体呈脉状、透镜状, 总体倾向SE($125^\circ \sim 140^\circ$), 倾角 $52^\circ \sim 65^\circ$, 单矿体长度 $80 \sim 220 \text{m}$,

平均厚度3.2m(变化范围1.8~5.6m)。(3)新增金矿资源储量核算结果:经加权平均估算,新增(332+333)金矿石量93.5万t,金属量约5.82t,平均品位6.23g/t,其中-600~-800m深度段占新增储量的72%^[5]。

3.3 技术应用效果对比分析

(1)新老找矿技术勘查精度、效率对比:广域电磁法相比传统激电中梯,探测深度从500m提升至1200m,异常定位误差由50m缩减至28m;三维重磁反演较二维剖面解释,构造界面识别准确率提高42%;野外数据采集效率提高约30%。(2)深部矿体预测值与钻探实测值误差分析:以5个验证孔统计,矿体顶板埋深预测平均误差12.4m(相对误差1.8%),矿体厚度预测平均误差0.45m(相对误差14.1%),品位预测误差0.9g/t(相对误差14.5%)。(3)本次技术体系经济、工程应用效益分析:较传统“激电中梯+单一大钻”方案,减少无效钻探进尺1600m,节省直接费用约256万元;勘查周期由8个月缩短至5个月;每吨金勘查成本降低约1.2万元。

3.4 技术短板与矿区深部找矿优化建议

(1)当前深部找矿技术现存局限性:广域电磁法在>1000m深度电阻率分辨率下降至 $\pm 80\Omega\cdot m$,难以识别厚度<5m的薄矿体;重磁联合反演受浅部闪长玢岩脉(强磁性)干扰存在多解性,低磁异常区与矿化蚀变区不完全对应;深部钻探成本高(约1800元/m),控制网度稀疏(200m×200m)。(2)郭城金矿下一步深部、边部找矿方向:向-900~-1200m第三成矿阶梯探索,重点验证广域电磁法显示的深部低阻梯状变化带;矿区东侧荆山群大理岩与花岗岩接触带及NW向次级断裂交汇

部位;-350m中段北段坑道外侧的构造下盘。(3)胶东同类金矿深部勘查技术推广建议:优先推广“广域电磁法精细扫描+高精度重磁三维反演+构造蚀变三维建模”技术组合,建议在招平断裂带南段、焦家断裂带深部(-1000m级)开展示范应用,同时建立胶东金矿深部物性参数数据库。

结束语

本次研究构建的多源耦合深部找矿技术体系,适配郭城金矿复杂深部勘查环境,实现千米级深部矿体精准预测,勘查效益与找矿成果显著。研究证实矿区-900m以下存在第三成矿阶梯,深部找矿潜力充足。现有技术仍存在超深分辨率不足、反演多解性等缺陷,后续需优化物探参数、加密工程控制。该技术组合可向胶东主干断裂带同类金矿推广,赋能区域金矿深部资源勘探开发。

参考文献

- [1]曹鹏,杨亚琦.胶莱盆地东北缘郭城金矿床控矿构造解析和成矿预测[J].地质力学学报,2025,31(03):412-424.
- [2]李志强.胶莱盆地东北缘郭城金矿床成矿流体特征及矿床成因[J].黄金,2024,45(05):57-63.
- [3]陈原林.胶莱盆地郭城—崖子断裂带金矿集区剥蚀程度及深部找矿潜力[J].中国有色金属学报,2022,32(09):278-282.
- [4]刘必政.胶东郭城地区龙口-土堆金矿区深部成矿规律与找矿技术优化[J].矿产勘查,2023,14(08):152-159.
- [5]宋明春,宋英昕.深部矿阶梯找矿方法:以胶东金矿集区深部找矿为例[J].中国地质,2022,49(01):148-152.