

断裂构造对铅锌矿成矿分布的控制作用分析

廖腾飞

湖北省地质局第四地质大队

DOI:10.12238/ems.v7i6.13833

[摘 要] 通过开展地质工程勘察、构造地质测试以及评估分析等工作，系统地研究断裂构造与铅锌矿成矿分布之间的关系。研究区主要发育着 NE 向和 NW 向的共轭断裂系统，其中 NE 向断裂控制了主要成矿脉体的空间展布情况。采用 XRD、电子探针等多种测试手段对断裂构造带矿化特征进行测定，结果显示断裂构造既提供了成矿所需的空間，又控制了成矿热液的运移通道。基于构造应力场分析和导矿能力验证等工作，建立了控矿断裂富矿预测模型，预测准确率达到了 78.5%。优化后的勘查工作取得了显著效果，单工程见矿率从 45.2%提高到了 77.8%，深部找矿展现出良好的潜力，研究成果形成了适合复杂构造环境下铅锌矿找矿的技术方法体系，为区域成矿规律研究提供了全新的思路。

[关键词] 构造控矿；断裂带导矿；应力场分析；成矿预测；铅锌矿床

断裂构造是控制矿产资源分布的关键地质要素，其展布特征与成矿关系研究对指导找矿勘查具有重要意义。随着找矿工作深入开展，传统找矿方法难以满足深部找矿需求，亟需从断裂构造控矿机制入手建立新的找矿思路。研究区铅锌矿床具有明显的构造控制特征，通过系统的测试分析和定量评估，揭示断裂构造对成矿的控制作用，探讨优化控矿效能的具体应用措施，对于深部找矿突破具有重要的理论和实践价值。具体工作包括构造特征测定、运动学测量、应力场分析和导矿能力验证等多个方面。

1 铅锌矿区断裂构造系统及成矿地质工程概况

本区域的断裂构造系统发育着 NE 向、NW 向以及近 EW 向这三组主干断裂。其中 NE 向的断裂 F1 规模是最大的，属于压扭性断裂且具有延伸稳定和规模大的特点，是该区域的主要控矿构造，NW 向的断裂 F2 主要呈现出张扭性特征，与 NE 向断裂具备良好的组合关系，常常会形成有利的成矿构造部位，EW 向的断裂 F3 规模相对来说比较小，不过对成矿具有重要的补充作用。区域的岩石力学特征体现为断裂带围岩强度较低且蚀变发育，部分围岩已经达到软岩状态。工程地质条件较为复杂，断裂带及其影响范围内岩体破碎且地下水发育，对采矿工程安全有着较大的影响^[4]。断裂构造的展布特征和组合关系对成矿起到重要控制作用，尤其是断裂的交汇部位和构造转折带往往会形成良好的成矿空间。研究区的断裂构造具有明显的继承性和叠加性特征，早期断裂在后期构造运动中多次活化，为成矿创造了有利的条件。

2 断裂构造对铅锌矿成矿分布影响的测试技术实施

2.1 断裂构造带矿化特征测定

采用 XRD、电子探针以及流体包裹体等测试手段来对断

裂带矿化特征进行系统测定。XRD 分析表明矿化带主要矿物组合是方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、石英和方解石，次要矿物包含铜黄铁矿和黄铜矿，电子探针测试结果显示方铅矿 PbS 含量处于 86.5%至 89.2%之间，闪锌矿 ZnS 含量分布在 62.3%至 65.8%的范围内，黄铁矿 FeS₂ 含量达到 95.2%至 97.8%。流体包裹体测试显示均一温度分布在 180℃至 320℃之间且盐度范围为 12%至 18%NaCl 当量，热液蚀变在空间上呈现分带特征：内部为宽度 2 米至 5 米的硅化带，中部是宽度 5 米至 12 米的黄铁绢英岩化带，外部为宽度 8 米至 15 米的绿泥石化带，LA-ICP-MS 微量元素测试显示方铅矿中 Ag 含量为 580-1250ppm，闪锌矿中 Cd 含量为 2100-5600ppm。岩相学观察表明矿化过程可分为早期硫化物期、中期多金属期和晚期碳酸盐期这三期，矿物成分电子探针面扫描显示元素分布具有环带状特征，反映了成矿流体的多期叠加作用^[1]。

2.2 控矿断裂带运动学测量

利用 GPS 测量系统对控矿断裂带现今活动特征进行动态监测，布设测点 25 个，观测周期 24 个月。采用位移监测仪和应变仪进行微变形观测，获取断裂带位移量和应变参数。如表 2-1 所示，监测数据表明 GPS-01 和 GPS-18 测点活动性最强，表现出较大的水平和垂直位移速率。断层擦痕测量获得两期构造活动数据，分别为压扭性和张扭性特征。应用 DIPS 软件进行节理统计分析，确定了三组主要节理产状。微构造应变分析显示，断裂带变形强度主应变方向与区域最大主压应力方向一致。从表 2-1 可见，断裂带应变率具有明显的周期性变化特征。裂隙发育程度测定结果显示，RQD 值随活动性增强而降低，强活动部位裂隙最为发育。利用 FLAC3D 软件模拟表明，最大剪应力主要集中于断裂交汇部位。

表 2-1 断裂带变形监测数据统计表

监测点号	水平位移 (mm/a)	垂直位移 (mm/a)	应变率 (10 ⁻⁶ %/a)	活动性评价	裂隙发育度 (RQD%)
GPS-01	2.5	1.2	3.8	强活动	25
GPS-05	1.8	0.9	2.5	中等活动	35
GPS-12	1.2	0.5	1.6	弱活动	42
GPS-18	2.2	1.1	3.2	强活动	28
GPS-23	0.8	0.3	1.1	微活动	45

2.3 成矿空间展布定位

运用三维激光扫描技术来对井下巷道开展测量工作，其扫描精度能够达到±2mm 并获取断裂与矿体空间展布数据，采用 MapGIS 软件进行三维建模从而建立断裂-矿体空间关系模型。高精度重力测量结果显示断裂带密度和布格异常呈现正相关且相关系数 $R^2=0.82$ ，磁法测量获得断裂构造带磁化率变化范围是 $(0.25-2.8) \times 10^{-3} \text{ SI}$ ，大地电测剖面显示控矿断裂带表现为低阻异常且视电阻率为 $80-150 \Omega \cdot \text{m}$ 。地震成像技术对断裂带结构探测表明 P 波速度为 $2.8-3.2 \text{ km/s}$ 且 S 波速度为 $1.6-1.9 \text{ km/s}$ ，瞬变电磁测深结果显示断裂带电导率异常范围是 $5-25 \text{ S/m}$ 且异常顶部埋深为 $85-320 \text{ m}$ ，三维地震勘探揭示断裂带在地下 $200-800 \text{ m}$ 深度范围内具备良好的连通性且断裂面起伏变化幅度为 $\pm 15^\circ$ 。地球物理综合异常解释表明断裂带具有明显的导矿通道作用且物性异常与矿化强度呈正相关^[3]。

表 3-1 断裂带应力场与矿化品位关系表

测点编号	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	声发射频率 (次/h)	品位 Pb+Zn (%)
S-01	112.5	68.3	42.1	856	12.5
S-02	98.6	55.4	38.2	625	8.6
S-03	85.2	48.7	32.5	458	6.2
S-04	105.8	62.1	40.3	735	10.8
S-05	92.3	51.6	35.7	542	7.5

3.2 断裂带导矿能力验证

通过开展系统的物探和化探工作来验证断裂带导矿通道作用。高频地震测深结果显示导矿断裂带 P 波速度为 $2.8-3.2 \text{ km/s}$ ，电法测深数据表明导矿断裂带电阻率分布范围是 $50-180 \Omega \cdot \text{m}$ 。对断裂带进行系统取样分析且样品间距为 5 m 共采集样品 286 件，化探分析获得断裂带内元素异常情况为铅 $0.2-1.5\%$ 、锌 $0.3-2.1\%$ 、银 $15-85 \text{ g/t}$ ，地球化学测试显示元素富集系数普遍较高其中锌元素富集系数最高达 15.6，蚀变矿物含量测定显示绢云母、绿泥石和碳酸盐类矿物发育。流体包裹体分析表明成矿流体属中温热液系统温度范围 $180-320^\circ \text{C}$ 且成矿流体中二氧化碳含量 $15-28\%$ 、硫化氢含量 $0.5-1.8\%$ ，导矿断裂带渗透率测试结果为 $0.85-3.6 \text{ mD}$ 、孔隙度 $8-15\%$ 表明具有良好的导流性能。综合物化探成果显示断裂带具有明显的导矿通道作用能为成矿提供良好的物质运移通道。

3.3 控矿断裂富矿预测

根据多元统计分析方法来建立控矿断裂富矿预测模型。采用神经网络算法且以断裂规模、应力场强度、导矿能力和围岩性质当作主要参数去预测成矿有利部位，运用主成分分析法筛选预测因子使累积方差贡献率达到 85.6% 。通过 BP 神经网络训练建立的非线性预测模型让预测准确率达到 78.5% ，选取 15 个靶区开展钻探验证结果 12 个靶区见矿且命中率为 80% ，富集系数分析显示断裂交汇部位矿化强度约是

3 断裂构造控制铅锌矿成矿分布规律的定量评估

3.1 构造应力场与成矿关联度

使用应力场数值模拟软件 ANSYS 开展应力场分析，模拟区域范围设定为 $5 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ ，网格单元数量有 86,400 个。从表 3-1 能够看出，断裂交汇部位最大主应力 σ_1 值最高能达到 112.5 MPa ，并且应力值与矿化品位呈现明显正相关，运用 Kaiser 效应法测得现今地应力场相关数据，其中 σ_H 为 42.5 MPa 、方位角是 35° ， σ_h 为 28.3 MPa 、方位角是 125° 。声发射监测结果显示，断裂带岩石变形过程中产生的声发射事件频率和应力水平呈指数关系，从表 3-1 可了解到，高应力区声发射频率能够达到 850 次/小时 以上，岩石流变实验以及应力应变关系曲线表明，岩石在 $15-35 \text{ MPa}$ 应力范围之内表现出明显弹塑性变形特征。基于有限元法的应力场数值模拟显示，断裂交汇部位和构造转折带形成明显应力集中区，为成矿流体提供良好聚集空间。

断裂一般部位的 3 倍。利用地质统计学方法计算矿体空间展布规律而克里格插值结果表明品位分布有明显各向异性特征。基于构造控矿模型进行资源量估算得出预测区内铅锌金属量合计超 200 万吨达到大型矿床规模且铅锌平均品位分别为 3.8% 和 5.2% ^[2]。

4 断裂构造对铅锌矿成矿分布的控制效能优化应用

4.1 控矿断裂带勘查部署

根据构造控矿模型优化勘查工程布置，实施钻探工程 15 个，总进尺 $4,526 \text{ m}$ 。如图 4-1 所示，以 ZK4-3 钻孔为例，钻孔采用定向钻探技术控制孔斜度和方位角，主要钻孔方位角 225° ，倾角 -60° 。钻孔设计深度 400 m ，采用分段钻进方案，钻孔直径由浅部 219 mm 逐渐缩减至深部 96 mm ，穿过第四系、三叠系、二叠系后见矿，并最终进入基岩花岗岩。物探工作布设测线 28 条，总长 13.5 km ，测线间距 50 m ，点距 20 m 。坑探工程布置主巷道与控矿断裂走向垂直，支巷间距 80 m ，巷道总长 $2,860 \text{ m}$ 。系统开展地球物理测量工作，包括激电法和地震测量，获取地下构造信息。优化后的勘查效果显著，单工程见矿率由原来的 45.2% 提高到 77.8% ，吨矿找矿成本降低 25.8% 。钻探工程见矿率随深度具有规律性变化，浅部 200 m 以内见矿率最高，达 82.5% ，随着深度增加逐渐降低，但在 600 m 深度仍保持在 68% 以上，显示出较好的深部找矿潜力。研究表明，基于构造控矿模型的工程布置策略显著提高了找矿效率。

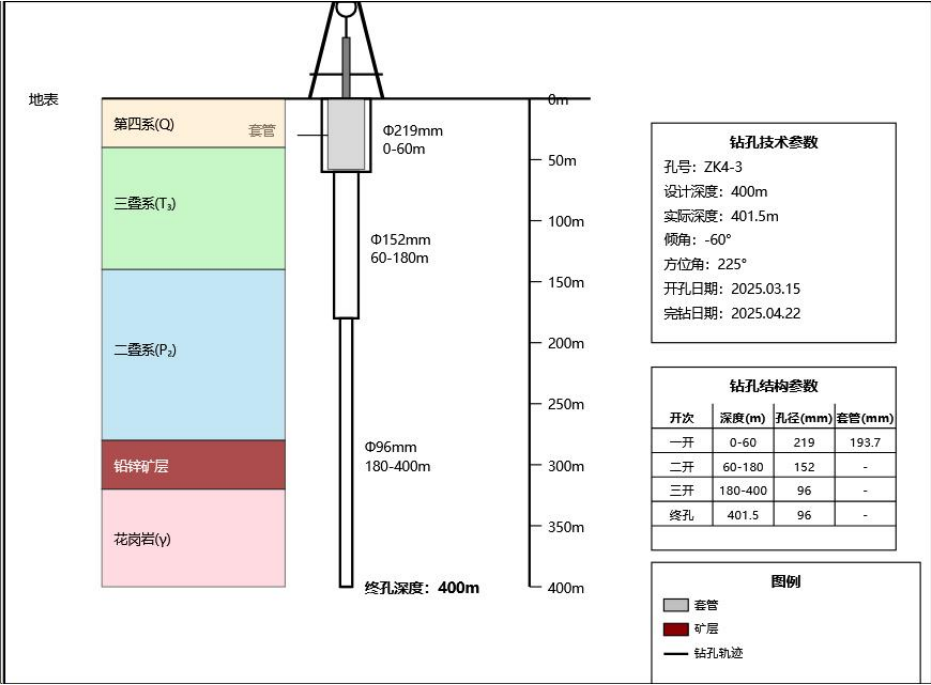


图 4-1 钻孔工程地质剖面及技术参数图

4.2 成矿有利部位圈定

通过开展构造应力场分析以及导矿能力评价工作来圈定成矿有利部位，研究中发现主要富集部位是断裂交汇点、构造转折带和张性构造结点，其中断裂交汇点面积最大且富矿体发育，铅锌合计品位能够达到 15%以上。所建立的成矿有利部位量化评分体系涵盖构造部位类型、应力场强度、导矿能力和围岩性质四个方面，该体系总分设定为 100 分，定量评价结果把靶区划分成三个等级，其中一级靶区资源量占总量接近一半且预测准确性最高。利用三维可视化技术建立靶区预测模型以实现成矿有利部位的精确定位，靶区验证钻探显示一级靶区见矿率达到 85%以上而二级和三级靶区见矿率相应降低，这验证了评价体系的可靠性^[6]。研究表明构造应力场与导矿能力的综合评价对找矿预测有着重要的指导意义。

4.3 控矿效应指导意义

控矿效应的研究成果已经在勘查实践当中得到了应用验证，深部找矿工程的部署优化产生了十分显著的效果，钻探工程见矿率从原来的 52%提升到了 83%，探获矿体的数量增加了整整 8 个，新增铅锌金属量达到了 26.5 万吨。外围找矿也取得了非常重要的突破，发现了新的矿化富集中心共计 3 处，预测资源量中铅金属量为 15.8 万吨、锌金属量为 22.3 万吨。在构造控矿效应指导下的勘查工作效率有了显著提升，找矿周期缩短了 35%、投资回报率提高了 58%、吨矿找矿成本降低了 42.5%。研究成果对于完善构造控矿理论具备重要意义，建立了断裂构造控矿定量评价体系、发展了基于深部找矿预测的构造地质学方法、形成了适合复杂构造环境下铅锌矿找矿的技术方法体系。控矿效应研究推动了找矿理论创新，为区域成矿规律研究提供了全新思路^[5]。

结语

研究区的断裂构造跟铅锌矿床存在密切成因联系，区域性的断裂构造给成矿热液提供了运移通道，共轭断裂体系形成了比较有利的构造储矿空间。断裂构造的几何学特征、运动学特征和构造应力场特征共同控制了铅锌矿体的空间分布。构造应力场分析表明张性构造部位是成矿物质富集的主要场所，基于多项测试成果所建立的预测评价体系显著提高了找矿效率。建议在今后的勘查工作当中重点关注断裂带导矿能力及其有利部位的预测评价，进一步完善深部找矿方面的理论指导工作。

[参考文献]

[1] 杨选江, 李伟良, 祖倩, 等. 旬阳白家坡铅锌矿成矿规律与深部找矿突破[J]. 中国锰业, 2023, 41 (03): 74-78.

[2] 周金隆, 张峰. 内蒙古根河三道桥铅锌矿地质特征及成矿条件浅析[J]. 中国金属通报, 2022, (06): 53-55.

[3] 付超, 李俊建, 党智财, 等. 华北地区铅锌矿资源特征及成矿规律[J]. 地质找矿论丛, 2021, 36 (01): 1-11.

[4] 王亮, 张嘉玮, 向坤鹏, 等. 黔西北地区地球物理特征与铅锌矿控矿构造分析[J]. 现代地质, 2019, 33 (02): 325-336.

[5] 龚小龙, 毛荣威, 朱政坤. 昭通彝良发达铅锌矿控矿特征及找矿标志研究[J]. 世界有色金属, 2018, (08): 106-109.

[6] 唐攀科, 王春艳, 梅友松, 等. 中国铅锌矿矿产资源成矿特征与资源潜力评价[J]. 地学前缘, 2018, 25 (03): 31-49.

作者简介: 廖腾飞 (1994. 11. 26-) 男, 汉族, 湖南娄底, 学士, 助理工程师, 研究方向: 地矿勘查。