

# 激发极化法在锡多金属矿勘查中的应用研究

赵文波 李春风 刘含漪

中国水利水电科学研究院, 北京, 100048;

**摘要:** 隐伏矿产埋藏深度大, 矿床地质特征不易掌握; 寻找隐伏矿产一方面依赖于地质成矿理论的指导, 另一方面也需要依靠地球物理手段间接求取深部信息。激发极化法是以不同岩石、矿石的激电效应为基础, 通过观测和研究大地激电效应来探测地下地质情况的一种勘探方法。利用激电中梯可以发现并圈定金属矿的激电异常分布区带, 利用激电测深可以查明极化异常体的展布。通过对某锡多金属矿区激电异常及其特征的分析研究, 结合已知地质、物性资料, 查明工作区内成矿破碎带的分布, 为深入开展地质找矿工作提供有利依据。

**关键词:** 激发极化法; 激电中梯; 激电测深; 视电阻率; 视极化率; 视金属因素

DOI:10. 69979/3041-0673. 24. 5. 053

## 引言

时间域激电方法是目前地质勘查工作中常用的地球物理手段, 广泛应用于水资源及矿产资源勘查项目中。针对不同的目标地质体, 需要对激电参数反映的物性信息进行具体分析。本文重点介绍利用激发极化法二维反演成果、水文地质条件、各类先验信息进行地质解译, 探测萤石矿化断裂带深部多金属矿化情况。

## 1 地质背景

### 1.1 地层

工作区地层出露单一, 主要为中生界上侏罗统张家口组(J3z)和第四系(Q)。中生界上侏罗统张家口组(J3z)地层出露较广, 岩性为石英粗面岩、粗面岩, 少斑、多斑的斑状结构为主, 局部呈无斑隐晶质结构, 块状构造。新生界第四系主要分布于工区西北部的山间凹地及冲沟中, 为洪冲积和坡积砂质粘土、细砂等堆积, 上部覆盖风成砂, 厚度最大可达 10m 左右。

### 1.2 岩浆岩

主要为浅成侵入的花岗岩、花岗斑岩( $\lambda \pi 52(3)$ ), 主要出露于勘查区的东南边缘以及勘查区以西, 侵入于张家口组二岩段粗面岩、石英粗面岩中。呈斑状结构、粗粒等粒结构, 块状构造。

### 1.3 矿石类型及结构构造特征

锡矿石呈细脉状、网脉状、浸染状分布于密集节理化带、破碎带中。矿石类型以锡石-石英脉型为主, 矿石矿物主要为锡石、少量黑钨矿、辉钼矿, 脉石矿物为石英、绢云母及少量长石、萤石、方解石等。锡矿石主要呈细脉状、浸染状构造赋存于强蚀变粗面岩、石英粗面岩裂隙中, 围岩晶洞、晶

簇构造发育。

钨矿石主要呈细脉状、浸染状, 次为块状, 分布于内外接触带强蚀变岩石中, 矿石类型为石英-黑钨矿型。辉钼矿石呈细脉状、浸染状分布于外接触带裂隙和破碎带中; 矿石类型属于石英脉型, 矿石矿物主要为辉钼矿、黑钨矿, 脉石矿物主要为石英、萤石、方解石; 辉钼矿主要呈浸染状、细脉状构造, 分布于外接触带强蚀变岩石中。

黄铜矿石呈细脉状、脉状、浸染状分布于内外接触带的碳酸盐化裂隙带和破碎带中; 矿石类型属于脉状铜矿, 分布于外接触带强硅化、碳酸盐化石英粗面岩中。铅锌矿石呈脉状、细脉状, 主要分布于外接触带, 碳酸盐化裂隙带和破碎带中; 矿石类型为脉状铅锌矿, 矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿, 少量黄铜矿; 脉石矿物主要为碳酸盐、石英。

### 1.4 围岩蚀变

似斑状花岗岩内外接触带上, 岩石蚀变普遍, 蚀变类型主要为硅化、绢云母化, 次为绿泥石化、碳酸盐化、钾化、钠化和萤石化、电气石化。钾化、钠化主要分布于内接触带内; 硅化、绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化主要分布于外接触带内; 锡矿体、钨矿体、辉钼矿体主要分布于强硅化蚀变带内; 黄铜矿、方铅矿、闪锌矿体主要分布于中度硅化、碳酸盐化、萤石化蚀变带内。

强硅化、绢云母化、黄铁矿化是本区找矿的重要标志。

## 2 岩矿石电性特征

为了解工区内各类岩石极化率特征, 在工作区内采集了出露岩石标本进行物性测定。物性标本共采集 57 块, 其中萤石矿石 19 块, 粗面岩 14 块, 硅化蚀变粗面岩 15 块, 多金属矿石 6 块, 钨矿化石英岩 3 块, 并对这些标本进行了极化率测定, 测定结果见表 1。

表 1 岩矿石物性统计表

岩矿石名称	块数	极化率 (%)		
		均值	最小值	最大值
萤石矿石	19	2	0.9	3.3
粗面岩、石英粗面岩	14	2.1	1.3	3
硅化蚀变粗面岩	15	2.7	1.9	3.8
多金属矿石	6	4.9	4.5	5.4
钨矿化石英岩	3	3.1	2.7	3.3

注：利用激电模拟器做为小功率发送机配合接收机进行测量，采用与野外一致的工作参数测得岩石标本的极化率。

区内岩矿石的极化率以多金属矿石为最高，均值达 4.9%；钨矿化石英岩次之，均值为 3.1%；而作为区内基岩主体的粗面岩极化率较低仅为 2.1%，但当其受到成矿地质作用而发生硅化蚀变时，其极化率有所提高，均值达 2.7%。区内的萤石矿石为各类岩矿石中极化率的最低者，但具有较大的变化范围，极化率值从 0.9%至 3.3%不等。理论上讲，萤石的激发极化效应应非常弱，因此其极化率应为低值，本区内萤石矿具有较高的极化率可能是由于局部地段的萤石伴生有其他金属硫化物。区内广泛分布的第四系砂土层，虽未进行极化率测定，但理论与实践均表明砂土层的极化率较低。

综上所述，区内的金属矿石具有较高的极化率，当其具有一定规模时，将会引起强度较高的视极化率异常；萤石矿石的极化率值变化范围较大，在萤石矿化区既可能出现高值异常，也可能出现低值异常；粗面岩极化率不高，将会表现为视极化率的背景场，但在其蚀变后极化率值随之增高，有可能出现强度较弱的视极化率异常；由此可知在本工区采用激发极化法寻找深部多金属矿化是可行的。

此外，岩矿石的电阻率虽与其物质组成和结构构造有关，但与其含水率的高低也存在着密切的相关关系，一般情况下，断裂构造会呈现视电阻率的相对低值；而就本区的锡多金属矿化体而言，由前述的地质矿产特征知，它们一方面受断裂构造的控制，充填于断裂破碎带中，作为电子导体的金属矿物会使其导电性增强；另一方面又受到强烈的硅化，使其电阻率增高，两者综合作用的结果是锡多金属矿化体表现为中等电阻率特征。

### 3 工作部署

本次电法勘探采用激发极化法，其中面积性工作采用中间梯度装置，测深采用对称四极装置。根据本区地质背景及岩矿石电性特征，垂直该矿脉布设北东东向的激电中梯测线，测线平行分布，线距 100m、点距 20m；加密测区线距 50m、点距 20m。为正确圈定设计工区内异常，实际勘探工作中对测区在原设计范围的基础上做了一定扩展。

激电中梯工作供电电极距为 1800m，供电电流不小于 3A，A、B 极供电电极采用环形排列的方式，电极总数为 50-60 根，相邻供电电极距与电极埋深相当。测量极距为 40m，接收极采用固

体不极化电极。采用占空比为 1：1 的双向短脉冲供电，供电脉宽±4 秒，周期 16 秒，采集延时 100ms，积分面积 50ms，同步方式采用自同步。

激电测深工作采用对称四极装置，供电与接收参数设置与激电中梯相同。但供电电流随供电电极距及测量极距的大小进行了调整。供电电极距 AB/2 和接收极距 MN/2 的极距变化见表 2。

表 2 激电测深极距表（单位：m）

AB/2	3	6	9	15	22	32	45	60	85	120	180	250	350	500	750
	1	1	1	1	1										
MN/2		5	5	5	5	5	5								
					20	20	20	20	20						
										50	50	50	50	50	50

利用激电中梯扫面结果进行综合分析，遴选出具有成矿意义的激电异常区；激电测深作为辅助方法，主要布置在上述激电异常区，目的是了解隐伏异常体的埋深、形态和赋存状态。

## 4 异常特征

### 4.1 视电阻率平面特征

从视电阻率平面等值线可以看出，本区视电阻率等值线主体呈现出近 NW 向展布的特点，全区视电阻率由西南向东北整体表现为高低相间分布之特征。经实地调查视电阻率大于 1400Ω·m 的高值区均分布于基岩裸露区或第四系沉积物较薄的地段，而视电阻率的低值区则分布于第四系沉积物较厚的区段，也就是说本区视电阻率的高低变化与第四系沉积物的厚度有着密切的反相关关系，即第四系沉积物厚度越大，视电阻率越低，反之亦然。但在视电阻率的极低值区，除较厚第四系产生的影响外，亦不排除断裂构造破碎带造成的叠加效应。

### 4.2 视极化率分布特征

从视极化率平面等值线可以看出：视极化率小于 2%的区域构成了本区的背景场区，视极化率同样表现为等值线主体呈现出近 NW 向展布的特点。全区视极化率由西南向东北整体表现为高低相间分布之特征。视极化率大于 2%的高值区均分布于基岩裸露区或第四系沉积物较薄的地段，而视极化率的低值区则分布于第四系沉积物较厚的区段。但在视极化率的极高值区及低背景场区中的局部高值区段除第四系厚度较小的影响外，也不排除有矿化蚀变的叠加作用存在。

### 4.3 异常区与矿化蚀变的关系

综合分析视电阻率与视极化率成果，无论是视电阻率还是视极化率异常，虽对已知的萤石矿（化）和锡多金属矿（化）有所反映，但存在着异常宽缓、范围较大，且两种参数之异常与已知矿化蚀变地段的对应关系不具备唯一性，也就是说，

无论是视电阻率还是视极化率异常均未对矿化蚀变地段予以准确定位,由本区岩矿石电性特征可知本区内的锡多金属矿(化)及萤石矿(化)均具有较高的极化率,考虑到本区矿化均受断裂构造控制,视电阻率应表现为中低阻特征。也就是说,本区的矿化蚀变区段应存在着中低阻高极化之特点,据此,求取了综合参数“视金属因素”,该参数为视极化率与视电阻率的比值,能对低阻高极化介质给予较好地反映。

可以看出,反映低阻高极化的视金属因素异常以 $3 \times 10^{-4} \text{S/m}$ 为下限值所圈定的异常范围大大缩小,且与已知矿化蚀变地段具有较好的对应关系。

认真分析本区地质成矿特征,将所圈定的视金属因素异常与视电阻率和视极化率资料进行综合对比分析,圈定具有一定找矿意义的异常区域。

## 5 反演与解释

该异常中心位于工区西北部的 800/2100 点~880/2600 点附近,按视金属因素  $JS=5 \times 10^{-4} \text{S/m}$  所圈定的异常形态呈不规则状;但当  $JS>6 \times 10^{-4} \text{S/m}$  所圈定的异常高值区分为南北三个局部异常,三局部异常均呈似椭圆状。其中,北部的异常 JS5-3 的长轴长约 200m,短轴长约 70m,长轴走向近 SN,视金属因素最高值大于  $7 \times 10^{-4} \text{S/m}$ ;中部的异常 JS5-2 的长轴长约 150m,短轴长约 100m,长轴方向 NW,视金属因素最高值亦大于  $7 \times 10^{-4} \text{S/m}$ ;其南部的异常 JS5-1 面积较小。平面视电阻率的低值异常区(视电阻率最小值低于  $250 \Omega \cdot \text{m}$ )和视极化率的高值区(视极化率值最大值大于 2.8%)与之相对应。

异常区基岩为张家口组石英粗面岩。为了解异常区的深部矿化,在该异常区的 2200 线和 2400 线布置了两条激电测深剖面。

由 2200 线激电测深视电阻率断面可以看出,视电阻率随着供电极距  $AB/2$  的增加亦逐渐增高,当  $AB/2<85\text{m}$  时,视电阻率横向变化较大,说明本区浅部岩层的不均一性较明显,引起这种不均一性的原因主要是第四系沉积物的厚度变化和基岩风化程度的差异。当  $AB/2>85\text{m}$  时,视电阻率的横向变化明显趋缓,表明本区深部岩石的均一性较好。由 2200 线激电测深视极化率断面可以看出,该剖面在 740 点附近有明显的视极化率高值区存在,此高值区呈上窄下宽之形态,最高值大于 3%,且与电测深的视电阻率的中阻区相对应。2200 线激电测深视极化率断面上,在 860 点附近的高背景区的深部存在着视极化率的局部高值区,视极化率的最高值大于 2.8%,其深部的高值区与 740 点附近的视极化率高值区连为一体。

剖面的测深资料经反演后所获取的视电阻率与视极化率的横向、纵向变化特征与前述的视电阻率与视极化率基本一致,可以看出该区段的浅层为低阻层,电阻率小于  $120 \Omega \cdot \text{m}$ ,应是第四系沉积物或不同程度风化粗面岩的反映,该层厚度

约 10m。其下伏的中阻层电阻率介于  $120 \Omega \cdot \text{m} \sim 560 \Omega \cdot \text{m}$  之间,应为未风化的粗面岩引起。粗面岩的厚度由西南向东北逐渐变小,自 600 点的约 250m 向北逐渐变薄至 920 点附近的约 170m。该层下面的高阻层,电阻率大于  $560 \Omega \cdot \text{m}$ ,有可能是完整性较好的花岗斑岩。可以看出,经反演后的视极化率异常明显变窄,深部展现出两个视极化率高值异常区,其异常中心点分别在在 700 点和 850 点,推测两个极化率异常均由矿化蚀变带所引起。推测 700 点附近的蚀变带带为一近于直立略向东北向倾的板状体,其宽度约 60m,顶面埋深约 100m;850 点附近的蚀变带带为一近于直立略向东南向倾的板状体,其宽度约 20m,顶面埋深约 120m,矿化蚀变带的应延入于花岗斑岩的内接触带,深度约 350m。

视金属因素和视电阻率、视极化率的异常特征具有较好的相似性。结合岩矿石电性特征可知,本区的多金属矿石和钨矿化石英岩均具有较高的极化率,推测该异常应由矿化蚀变带所引起,具有较好的地质找矿前景。

## 6 结论

获得的物探异常区以低阻高极化为主,与成矿有关的地质构造,很可能与围岩存在明显的电性差异,电阻率的纵向变化特征,能够在一定程度上反映构造的空间位置,可以作为找矿的间接线索。

通过系统验证,获得的异常区形态真实,与矿区已知蚀变矿化地质体的一致,说明勘查工作成果能够较为客观地反映矿区的地质、矿化的实际情况。在隐伏或深部多金属矿物的勘查中,激发极化法对矿区内金属矿(化)体及蚀变岩石有良好的反映,进而为指导工程验证提供较为充足的依据。

## 参考文献

- [1] Hermans T, Vandenbohede A, Lebbe L, et al. Imaging artificial salt water infiltration using electrical resistivity tomography constrained by geostatistical data[J]. Journal of Hydrology, 2012, 438-439(7): 168-180.
- [2] Hohmann G W. Three-dimensional induced-polarization and electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 2012, 40(2):309.
- [3] Yang Yubo, Zhang Guibin, Yao Chenglin, et al. Application of induced polarization method in mineral resources exploration[J]. Sustainability, 2023, 15(4):3840.

第一作者:赵文波,1967 年出生,汉.男,湖北武汉人,本科.高级工程师,主要从事质量检测与安全评价工作。