

陡倾型隐伏金属矿勘查关键

马晓东

(山东省地质科学研究所, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 自然资源部金属矿产成矿过程与资源利用重点实验室, 山东济南 250013)

[摘要] 以往陡倾型金属矿勘查钻孔的见矿率较低, 查找无矿钻孔出现的原因及提高钻孔见矿率成为陡倾型隐伏金属矿勘查的关键。本次通过陡倾型隐伏铜矿的勘查, 对陡倾型隐伏金属矿的无矿钻孔出现的原因进行分析, 以期有助于以后陡倾型金属矿床的高效勘查。根据岩石的物性特征, 选择激电中梯、激电测深综合物探方法, 进行钻探验证, 分析发现无矿钻孔主要是由矿体倾向发生反转和矿化不均一两种原因造成的。建议在分析确定好作为物探资料解译约束条件的深部金属矿体物性特征的前提下, 选择适宜的电法、磁法、重力等地球物理扫面和测深综合物探方法进行陡倾型隐伏金属矿的前期勘查, 主要利用附近钻孔有无矿化或利用物探测深的矿致异常有无间断来判断矿体矿化是否均一, 利用物探扫面矿致异常的位置或附近钻孔钻遇的矿体倾向特征及井中物探来判断矿体倾向是否发生反转。另外, 为提高陡倾型隐伏金属矿钻孔见矿的可能性, 建议多施工一些倾角较小的钻孔。

[关键词] 陡倾 隐伏金属矿 勘查 激电中梯 激电测深 岩石物性

[中图分类号] P631 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2021)01-0030-09

Ma Xiaodong. The key to exploration of steeply - dipping concealed metal deposits[J]. *Geology and Exploration*, 2021, 57(1): 0030-0038.

0 引言

由于成矿条件复杂性, 以往矿体倾向呈陡(急)倾型的铜矿、金矿、铁矿等金属矿的勘查钻孔见矿率较低(李松生, 1988; 张大伟等, 2011; 许长坤等, 2012; 李福疆, 2014; 刘奎松和周红霞, 2018), 有的因此贻误了下一步找矿, 因而查找无矿钻孔出现的原因及尽量减少无矿钻孔成为陡倾型隐伏金属矿勘查的关键。为降低勘查成本及提高找矿效率, 本次以深部隐伏陡倾型铜矿勘查工作获得的认识, 对陡倾型深部隐伏金属矿的勘查工作及无矿钻孔出现的原因进行分析并提出建议, 以期有助于以后金属矿床的高效勘查。

1 地质概况

矿区地层主要为第四系(图1), 岩浆岩主要为二长花岗岩及少量的基性岩脉。因含水层较浅, 早期普查工作仅在地表施工少量的探槽工程; 探槽揭露的矿体1和矿体2分别长约104 m、38 m, 厚度约1.7 m, 最厚为4.5 m, 品位0.37%~0.61%。矿石主要为脉状含黄铜矿石英脉型矿石, 矿脉充填于基性岩脉与二长花岗岩之间断裂F1中, 地面出露矿体倾向SW, 倾角85°~87°, 延深不详; 矿石金属矿物成分以黄铜矿为主, 其次为少量的斑铜矿、蓝铜矿、孔雀石、镜铁矿等; 脉石矿物以石英为主, 次为方解石等。

[收稿日期] 2020-01-12; **[改回日期]** 2020-12-14; **[责任编辑]** 张 征。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(编号:41772076、41672084、41372086和41503038)、山东省泰山学者项目、山东省重点研发计划项目(编号:2017CXGC1601、2017CXGC1602 & 2017CXGC1603、2016YFC0600105-04 & 2016YFC0600606)、山东省地质勘查项目《山东省重要岩浆事件年代学厘定及测试方法岩浆》(编号:鲁勘字<2019>8号)、《山东省金、稀有、稀土矿产典型成矿区成矿作用研究》(编号:鲁勘字<2020>7号)及山东省自然科学基金项目(编号:ZR2019PD019)、山东省博士后创新项目专项资金(编号:201903084)和科技部国家重点研发计划课题《蚀变岩型金矿立体地球化学探测试验示范》(编号:2016YFC0600606)联合资助。

[第一作者] 马晓东(1972年-), 男, 1993年毕业于成都理工学院, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及研究工作。E-mail: smxd2007@qq.com。

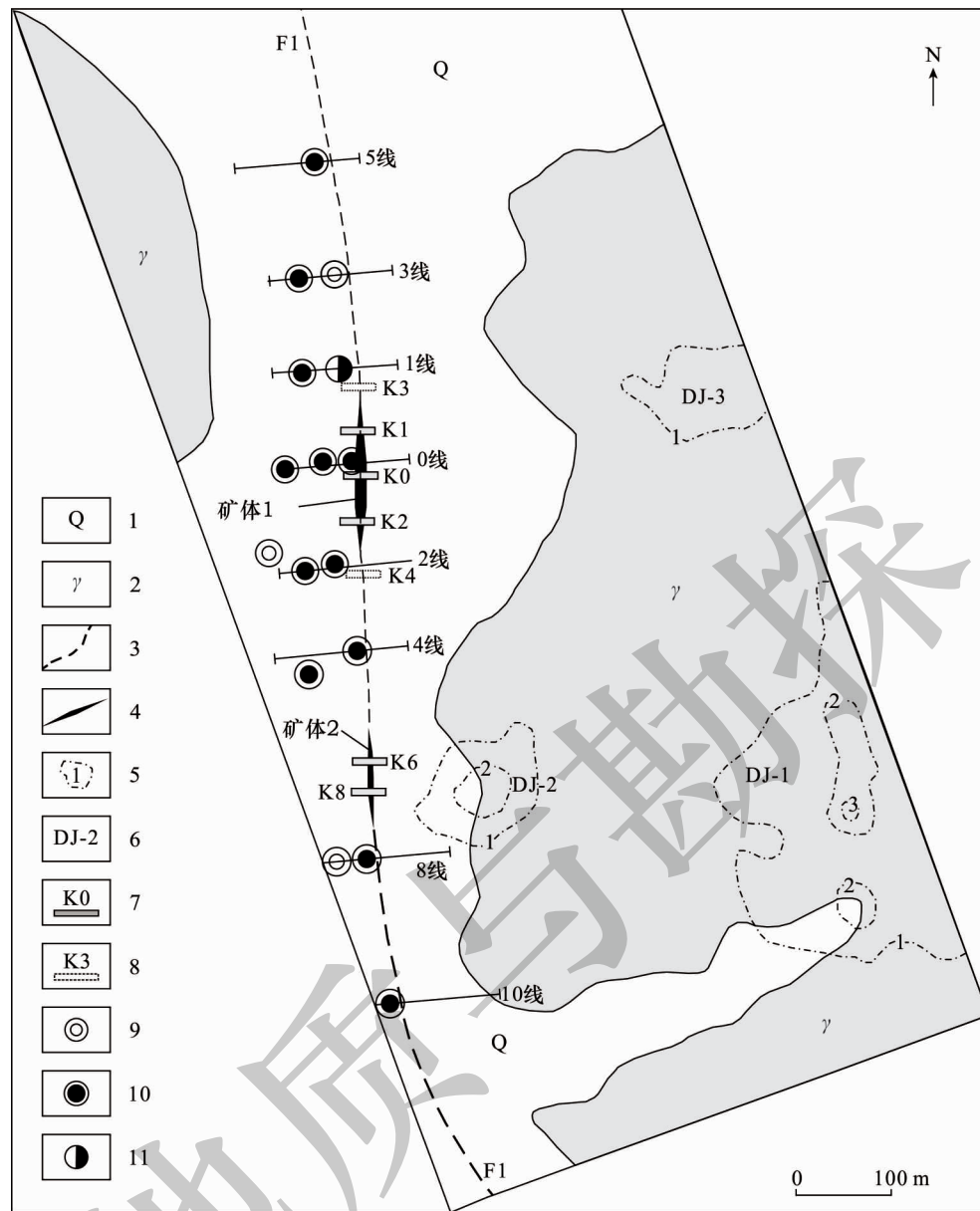


图1 矿区地质简图

Fig.1 Geological map of mining area

1 - 第四系;2 - 花岗岩;3 - 断裂;4 - 探槽圈定矿体;5 - 极化率等值线(%);6 - 极化率异常区;7 - 见矿探槽;8 - 未见矿探槽;9 - 未见矿钻孔;
10 - 见矿钻孔;11 - 矿化钻孔

1 - Quaternary;2 - granite;3 - fault;4 - orebody delineated by trench;5 - polarizability contour(%);6 - polarizability anomaly;7 - trench with ore occurrence;
8 - trench without ore occurrence;9 - drill hole without ore occurrence;10 - drill hole with ore occurrence;11 - drill hole with mineralization

2 物探工作

2.1 岩矿石物性特征

岩石与矿石间显著的物性差异是地球物理勘探方法有效性的物理学基础(姚卓森和秦克章, 2014)。首先在地表采集各类较新鲜的岩矿石标本对其极化率及电阻率进行测试,采用仪器为DMF-2微功率检测发射仪和DJS-8接收机。花岗岩是

本区广泛分布的围岩,铜矿化带产于花岗岩内的蚀变带内。花岗岩的平均极化率为0.96%(表1),电阻率平均值为 $471 \Omega \cdot m$,两者在本区都是中等的,说明本区的视极化率和视电阻率背景值都是中等强度的。基性岩以岩脉的形式产于花岗岩内,平均极化率为0.38%,电阻率平均值为 $359 \Omega \cdot m$,其极化率及电阻率与花岗岩相当,一般不引起异常。铜矿产于花岗岩与基性脉岩的接触蚀变带内,硅化明

显,黄铜矿物的分布不连续,由于地表铜矿样品含孔雀石较多,其电阻率变化范围为 $575 \sim 1653 \Omega \cdot \text{m}$,平均 $935 \Omega \cdot \text{m}$,远高于花岗岩和基性脉岩;极化率变化范围是 $0.13\% \sim 1.19\%$,平均 0.51% ,低于花岗岩,但没有较大差别。铜矿石极化率低的原因是由于地表样品含孔雀石较多和氧化程度较高及金属矿物分布不连续,推测当深部黄铜矿等金属矿物含量增高和氧化程度降低时,将会引起高极化率异常,结合以往的类似区成果资料,推断深部铜矿化带具

有高阻高极化率特征。因此本区矿体与围岩具有明显的电性差异,具备电法测量的地球物理前提。激电法在铜、金等金属硫化物矿床勘查方面(陈伟军等,2016;朱卫平等,2017;蒙凯等,2018;侯俊富等,2019),特别是深部隐伏金属硫化物矿床勘查方面发挥了很好的找矿作用(张前进和杨进,2010;任喜荣等,2015;周多等,2016;孙仁斌等,2017;李希等,2017;刘星和杨秋访,2018)。故本次依据岩石物性特征选择了激电中梯及激电测深综合物探方法进行前期勘查。

表 1 岩石电性参数测定统计表

Table 1 Statistics of measured electrical parameters of rocks and ores

序号	岩性	标本号	视电阻率 $\rho_s (\Omega \cdot \text{m})$			视极化率 $\eta_s (\%)$		
			极大值	极小值	平均值	极大值	极小值	平均值
1	花岗岩	1	418	409	414	1.12	1.09	1.10
2		2	690	679	685	0.45	0.42	0.43
3		3	319	314	316	1.30	0.90	1.10
4		4	615	605	610	0.39	0.35	0.37
5		5	333	330	331	1.80	1.77	1.78
6	基性脉岩	1	455	454	454	0.38	0.37	0.38
7		2	375	368	372	0.33	0.32	0.33
8		3	320	310	315	0.34	0.28	0.31
9		4	319	314	317	0.59	0.53	0.56
10		5	340	335	338	0.33	0.29	0.31
11	铜矿石 (氧化)	1	589	575	582	0.33	0.28	0.30
12		2	1563	1530	1546	1.19	1.04	1.12
13		3	795	760	778	0.18	0.13	0.16
14		4	722	715	718	0.34	0.31	0.33
15		5	792	789	790	0.40	0.33	0.37
16		6	1198	1193	1195	0.93	0.69	0.81
17	铜矿石 (原生)	1	1199	1187	1193	4.23	4.05	4.14
18		2	1843	1823	1833	6.05	5.83	5.94
19		3	3428	3412	3420	4.12	4.02	4.07
20		4	6052	6028	6040	6.77	6.53	6.65
21		5	8001	7982	7991	2.77	2.69	2.73
22		6	2067	2043	2055	6.63	6.51	6.57

2.2 激电测量工作

激电中梯测网为 $50 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,测线间距 50 m ,每 1 m 一个号,编号南小北大,测点间距 10 m ,每 1 m 一个号,编号西小东大。使用仪器为 WDFZ-5A 大功率激电发射机和 WDJ5-2 直流激电接收机及配套设备。供电电源采用雅马哈 EF6600-5.5

kW 汽油发电机,配备重庆万马物探仪器有限公司生产的整流器,最大供电电压 950 V ,电流 3200 mA 。供电导线和测量导线使用铜芯粗导线,供电电极 A、B 各使用 20 根铁电极;测量电极使用重庆万马物探仪器有限公司生产的专用不极化电极。采用短导线法, $AB = 1000 \text{ m}$, $MN = 20 \text{ m}$,点距 $= 10 \text{ m}$;采用旁

侧0 m、50 m、100 m,在AB距的中段即600 m处进行观测。对供电导线和测量导线采用过水法进行漏电检查。施工中,对每次所布置的A、B极距,在观测前、后均进行漏电检查,保证供电导线的绝缘电阻大于2 M Ω ,观测导线的绝缘电阻大于8 M Ω 。供放电时间4 s $\times$ 4 s,延时100 ms,观测3个周期。对畸变点、可疑点等进行多次重复观测,保证观测数据可靠性及准确性。野外施工中,随时点绘激电中梯 η_s 值线平面图,指导野外工作的顺利开展。对所圈定的激电异常进行地表地质检查和必要的工程地质揭露。质量检查点占总工作量3.44%。检查点段均匀分布于全区,均方相对误差 $\leq$ 1.00%。

激电测深使用仪器为WDFZ-2型激电发射机及配套设备,选用10 kW发电机并配备整流器作供电电源。采用对称四极垂向等比激电测深法,最大 $AB/2 = 5 \times MN/2$,最大 $AB/2 = 500$ m。出工前对供电导线和测量导线采用过水法进行漏电检查;施工中每一点开始和换极距时,均进行漏电检查。野外仪器供电采用双向短脉冲供电方式,供放电时间4 s $\times$ 4 s,工作中采用积分与延时均为100 ms,观测3个周期。对畸变点、可疑点等均进行多次重复观测,质量检查点位占测深工作量的5.95%,检查点均匀分布于测深点,计算视极化率总均方误差为 $\pm 0.12\%$,视电阻率总均方相对误差为 $\pm 3\%$ 。

2.3 物探解释

激电中梯 η_s 等值线平面图显示区内极化率比较杂乱, η_s 值一般在1.0%~1.8%,局部大于2.0%,最大值为3.0%。经地表地质观察,工作区主要为花岗岩,局部有基性岩脉分布;区内岩体受构造控制明显,岩石由于构造活动,裂隙发育,错动大,加之矿物分布不均等因素影响,在视极化率场上反映为低而比较杂乱的电场特征,在矿体区显示为低极化率。以 η_s 值为1.0%以上圈定的具有一定规模的激电异常共3处,编号分别为DJ-1、DJ-2和DJ-3(图1),经野外地表查证DJ-1、DJ-3附近有电线杆,DJ-2附近没有电线杆等其他影响异物,推测DJ-2为矿致异常区。

本次在沿矿体走向两侧的被第四系覆盖的隐伏区共实施了3条激电测深剖面,编号分别为3线、2线、4线与勘探线位置及编号重合,测点点距10~20 m。

从图2的3线断面图可以看出,在170点附近

有较高的视极化率反映,以 $\eta_s = 1.8\%$ 圈定的异常带宽度约20 m,反映在 $AB/2 = 9 \sim 340$ m(换算深度6~220 m)之间,呈长条状,规模较大。异常极大值在170点的 $AB/2 = 34$ m(换算深度20 m左右)处, $\eta_s = 2.09\%$,且160点 $AB/2 = 70$ m(换算深度50 m)处和170点在 $AB/2 = 22 \sim 70$ m(换算深度15~50 m)范围内视极化率大于2%,为本次工作的异常最高地段,对应视电阻率剖面图中此处区域为相对高阻, ρ_s 值一般大于1000 $\Omega \cdot m$,可见该异常总体表现为高阻高极化特征,推断为铜硫化矿物富集体引起,其产状略微西倾。后期钻探施工两个验证孔,浅部钻孔仅见到基性脉岩,未见到矿体;深部钻孔垂深152 m处见矿,矿厚5.13 m,平均品位1.38%;表明其矿化不均一。

2测线视极化率绝对值不高, η_s 仅在局部地段超过1.5%,但由于本测线视极化率背景值较低仅为0.8%,相对异常在0.7%以上,又表现为次高阻特征,所以研究相对高视极化率异常同样对于找矿工作有一定的指导意义, $\eta_s = 1.4\%$ 等值线与 $\rho_s > 700 \Omega \cdot m$ 等值线有较好的对应关系,大体呈西倾态势,对比3线及0线矿体的倾角及倾向,矿化体在自北向南延伸过程中产状由近直立状逐渐变为趋于向西的陡倾状,这可能因控矿构造产状不规则造成的。该线钻探施工了3个验证孔,其中浅部2个钻孔见矿,深部钻孔没有见矿;较浅部钻孔垂深61 m处见矿,矿厚3.39 m,平均品位0.38%;较深部钻孔垂深166.9 m处见矿,矿厚3.36 m,平均品位0.21%。

4测线在200点附近地表处有相对高视极化率表现,但该处视电阻率没有相对高阻反映,可能为地表第四系覆盖引起的局部干扰异常。图中视极化率以 $\eta_s = 1.5\%$ 圈定的相对高极化体向下延伸良好,在 $AB/2 > 50$ m(换算深度35 m)下 $\eta_s > 1.8\%$,相对异常0.8%,说明矿化程度较高,对比视电阻率图可见高极化体基本位于 $\rho_s > 1000 \Omega \cdot m$ 的相对高阻区域内,综合表现为高阻高极化特征,推断为含铜硫化矿物富集体引起,其倾向西,倾角大。在 $AB/2 = 3 \sim 340$ m(换算深度3~220 m)的空间范围内,上窄下宽,且随着深度的增加硫化物富集程度也有所增加。钻探施工2个验证孔,浅部钻孔垂深20.8 m处见矿,矿厚6.66 m,平均品位0.61%;深部钻孔垂深242.5 m处见矿,矿厚2.88 m,平均品位0.34%,见矿效果较好。

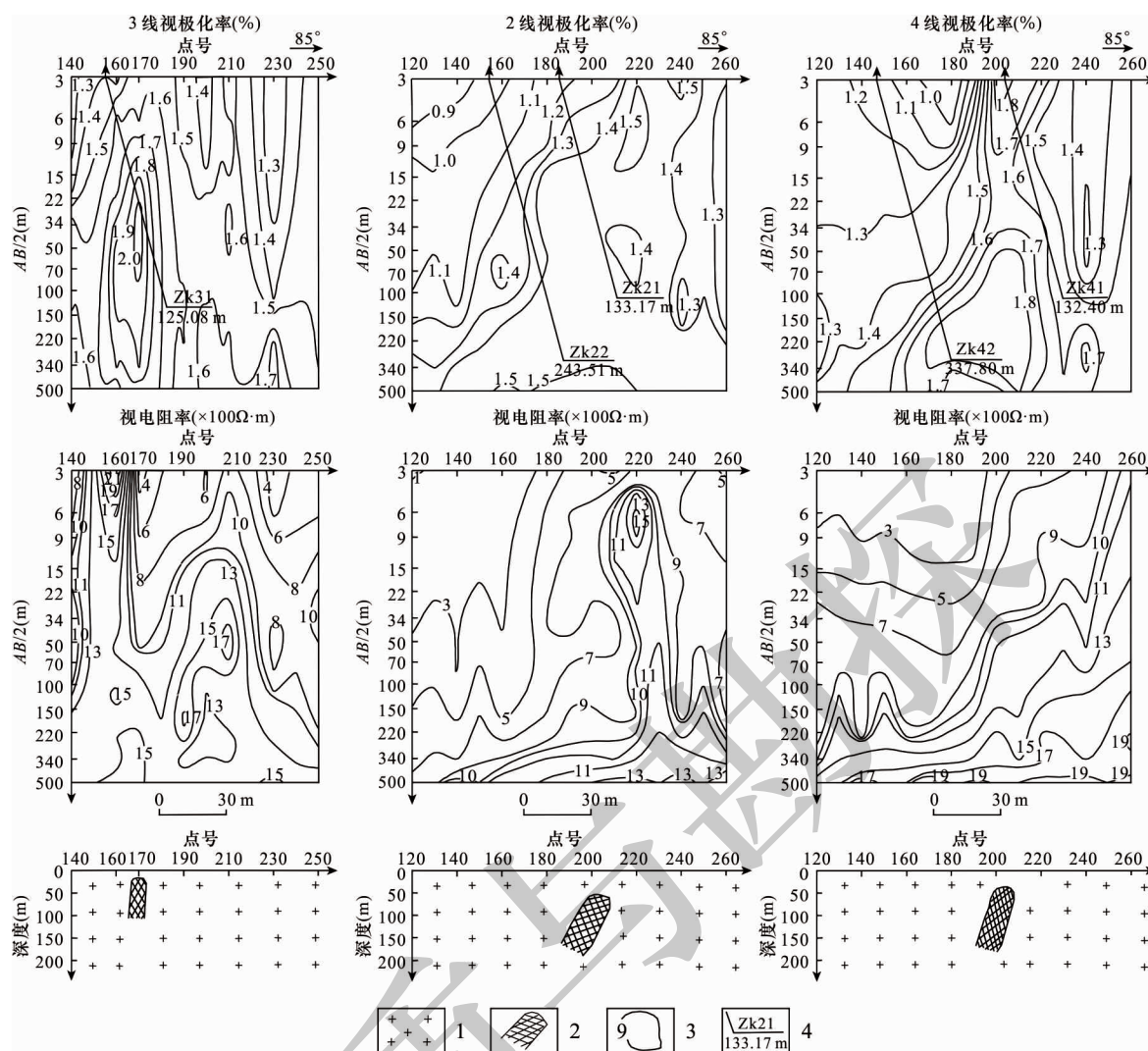


图2 激电测深3线、2线和4线的综合断面简图

Fig. 2 Comprehensive cross-sections of IP lines No. 3, 2 and 4

1-花岗岩;2-推测铜矿体;3-激电测深等值线(%);4-钻孔编号及终孔深度

1 - granite; 2 - inferred copper ore body; 3 - IP sounding contour (%); 4 - drill hole number and final depth

3 讨论

区内铜矿体在其走向及倾向上延伸趋势较好,并严格受断裂F1的控制,含铜热液沿断裂深部构造裂隙向上运移并在适当位置定位成矿,故断裂为铜矿提供了很好的导矿成矿构造地质条件。在地面可见断裂及矿体的走向线呈扭曲状,暗示深部断裂及矿体的倾向产状也可能发生扭曲变化。另外断裂和矿体多分布于基性脉岩的西侧或内部,因此基性脉岩也为断裂及矿体的形成提供了很好的地质前提环境。

该区地表矿石样品表现为高阻低极化率的物性特征,矿区激电中梯的极化率值也表现较低,结合以

往的有关资料认为极化率低的原因主要是由于地表矿石的含孔雀石较多及氧化程度较高造成的,推断当深部黄铜矿等金属矿物含量增高和氧化程度降低时,将会引起高极化率异常。本次利用深部铜矿体高阻高极化率的物性特征作为隐伏区的激电测深剖面资料解释的约束条件进行地质综合推断,推断的深部隐伏矿体特征与钻探结果吻合较好,表明本次实施的激电测深工作及其物探解译方法比较合理正确。因此在进行深部金属矿勘查时,在分析确定好作为物探资料解译约束条件的深部金属矿体物性特征的前提下,再选择适宜的物探方法进行勘查,能够取得很好的找矿效果。

本区共施工了16个验证钻孔,钻孔倾向全为

85°;只有2线最深钻孔倾角为80°,其余的全为75°。勘查3线浅部钻孔、2线最深钻孔、8线较深钻孔共3个钻孔没有见矿,离3线浅部无矿钻孔较近的1线浅部钻孔只见到矿化。0线、1线、3线、5线的最浅部钻孔见矿情况分别为矿体、矿化体、未矿化体、矿体,矿床矿化从有矿到矿化至无矿具有连续渐变过渡性特征,表明该矿床存在矿化不均一性和间隔性,并且3线浅部无矿钻孔附近也没有激电中梯矿致物探异常,也表明3线浅部钻孔没有见矿的原因主要是由于矿体矿化不均一发生矿化间隔造成的。

经计算投影分析,未见到基性脉岩及矿化体的2线深部无矿钻孔的终孔位置水平投影点,位于该线浅部两个见矿钻孔钻遇矿体时位置的水平投影点之间;2线北部附近0线最深钻孔钻遇矿体时位置的水平投影点,位于0线较浅的两个钻孔钻遇矿体时位置的水平投影点之间,表明矿体倾向已在0线位置发生反转;并且2线南部4线深部钻孔钻遇矿体时位置的水平投影点,位于4线浅部钻孔钻遇矿体时位置的水平投影点东部,表明矿体倾向也在4线较浅部位置也发生了反转;8线附近的激电中梯矿致异常DJ-2位于浅部矿体倾向的相反方向,表明矿体产状偏转中心位于该处附近,因此2线及8线的两个深部钻孔未见矿的原因是由矿体倾向发生反转造成的。

因此对于陡倾型金属矿勘查时出现未见矿钻孔的主要原因有两个:一个是矿体矿化不均一造成的;另一个是矿体倾向发生反转造成的。由于后期钻探工作量超量及经费不足,本次没有对激电异常DJ-2进行钻探验证,但通过地面查证及已施工的钻孔钻遇矿体的情况分析,本区激电异常DJ-2是矿体倾向在深部发生反转造成的矿致异常,故可以利用激电中梯异常来判断陡倾型铜矿体的倾向。

本次从施工的钻孔岩矿心中发现深部铜矿石有的发生了氧化,为了进一步了解本区铜矿石的电性特征,后期从钻孔岩矿心中挑选了本区深部未氧化的原生铜矿石标本,进行了电性测量(表1);经测量得知其电阻率变化范围是1833~7991 $\Omega \cdot m$,平均为3755 $\Omega \cdot m$;极化率变化范围是2.73%~6.65%,平均为5.02%;其电阻率和极化率都远高于花岗岩和基性脉岩。因此相对于围岩,金属矿石在电学、密度和磁化率等物理性质方面有显著差异性,能够产生高重力、高磁力、高极化等地球物理异常(姚卓森和秦克章,2014),物探方法能够有效地

获取深部隐伏矿存在各种信息,成为寻找深部隐伏矿的主要手段(吴其斌等,1999),因此可以通过电法、磁法、井中物探等方法测量的地球物理矿至异常推测陡倾型铁、铜、金、铅锌等隐伏金属矿体深部特征(何显文,1991;严加永等,2008;贾长顺等,2008;秦毅等,2012;薛明轩等,2012;郝兴中等,2013;于仕祥等,2014;邓波等,2014;牛军平等,2015;李希等,2017;孙仁斌等,2017;徐春华等,2018;蒙凯等,2018)。由于陡倾金属矿体倾向发生反转时角度变化较小,有时在地球物理测深曲线上反映不明显,但在地球物理扫面曲线上反映较明显,若矿致扫面物探异常出现在浅部金属矿体倾向的相反方向,表明金属矿体在该处或附近发生了倾向反转;附近钻孔出现只见矿化不见矿体现象,或者地球物理测深矿致异常出现间断不连续特征(贾长顺等,2008;谭红艳等,2011;田建磊等,2014;陈伟军等,2016),表明该矿体矿化具不均一性。故在对陡倾型金属矿进行勘查时,首先对岩矿石的地球物理性质进行详细分析的基础上,确定好作为物探资料解译约束条件的深部金属矿体物性特征的前提下,使用适宜的地球物理测深及扫面等综合物探方法进行前期勘查,及时利用物探资料成果和已施工的验证钻孔来判断陡倾金属矿体矿化是否均一及其倾向是否发生反转,可以减少无矿钻孔的出现。故为提高钻孔的见矿率,建议依据金属矿岩矿石物性特征,选择适宜的电法、磁法、重力等地球物理扫面和测深以及井中物探等综合方法进行陡倾型隐伏金属矿前期勘查,主要利用附近钻孔有无矿化或利用物探测深的矿致异常有无间断来判断矿化是否均一,利用物探扫面的矿致异常的位置或附近钻孔钻遇的矿体倾向特征及井中物探来判断矿体倾向是否发生反转。

由于钻探条件及经费等限制,本次施工的钻孔倾角为75°~80°,针对倾角较陡的隐伏陡倾斜型金属矿体,为了提高钻孔见矿的可能性,建议以后多施工一些倾角较小(45°~60°)的钻孔。

4 结论

(1)本次利用深部铜矿化带高阻高极化率的物性特征作为隐伏区的激电测深剖面资料解释的约束条件进行地质综合推断,推断的深部隐伏矿体特征与钻探结果吻合较好。故在进行深部金属矿勘查时,在分析确定好作为物探资料解译约束条件的深部金属矿体的物性特征前提下,再选择适宜的物探方法进行前期勘查,能够取得很好的找矿效果。

(2)通过陡倾型隐伏铜矿勘查实践发现,陡倾型隐伏金属矿勘查时出现未见矿钻孔的主要原因有两个:一个是矿体矿化不均一造成的;另一个是矿体倾向发生反转造成的。

(3)为提高钻孔的见矿率,建议在分析确定好作为物探资料解译约束条件的深部金属矿体物性特征的前提下,选择适宜的电法、磁法、重力等地球物理扫面和测深以及井中物探等综合方法进行陡倾型隐伏金属矿前期勘查,主要利用附近钻孔有无矿化或利用物探测深的矿致异常有无间断来判断矿体矿化是否均一,利用物探扫面的矿致异常的位置或附近钻孔钻遇的矿体倾向特征及井中物探来判断矿体倾向是否发生反转。另外,为了提高隐伏陡倾斜金属矿体钻孔见矿的可能性,建议多施工一些倾角较小的钻孔。

致谢:非常感谢评审专家提出的宝贵意见和建议。

[References]

- Chen Weijun, Jiang Xin, Hong Wanhua. 2016. Geological and geophysical exploration and research in the Laoguoqingzi Au - Cu deposit, Inner Mongolian, China [J]. *Geology and Exploration*, 52 (2): 246 - 250 (in Chinese with English abstract).
- Deng Bo, Li Jinzhong. 2014. The application of borehole geophysical exploration to metallic mineral exploration [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 34 (2): 276 - 280 (in Chinese with English abstract).
- Hao Xingzhong, Yang Yiheng, Li Yingping, Wang Qiaoyun, Wang Yingpeng, Wang Ligong. 2013. Prospecting model of Gangyi iron metallogenic belt in Shandong Province, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43 (4): 1136 - 1142 (in Chinese with English abstract).
- He Xianwen. 1991. Deep - seated highly conductive and magnetic orebody exploration using hole to hole comprehensive geophysical prospecting [J]. *Geology and Prospecting*, 27 (5): 43 - 46 (in Chinese with English abstract).
- Hou Junfu, Suo Longdunzhu, Zhang Geli, Xiao Yang, Su Baohua, Yuan Huashan. 2019. Application of the induced polarization method in exploration of the Angqing silver polymetallic deposit in Tibet [J]. *Mineral Exploration*, 10 (2): 302 - 309 (in Chinese with English abstract).
- Jia Changshun, Zeng Qingdong, Xu Jiuhua, Liu Jianming. 2008. Characteristics of ore - controlling folds and orientation of ore prospecting in the Baiyinnuoer lead - zinc deposit, Inner Mongolia [J]. *Journal of University of Science and Technology (Beijing)*, 30 (4): 331 - 338 (in Chinese with English abstract).
- Li Fujiang. 2014. A brief discussion on the production and exploration of Keketale lead zinc deposit [J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 37 (1): 22 - 28 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianliang. 2016. Application of the down - hole IP method to a general survey in the Jinya gold deposit [J]. *Geology and Exploration*, 52 (5): 924 - 930 (in Chinese with English abstract).
- Li Songsheng. 1988. Calculating the reserves of gold - quartz veins by specific ore content method [J]. *Geology and Exploration*, 24 (6): 33 - 36 (in Chinese with English abstract).
- Li Xi, Gao Hangxiao, Yang Xu, Zhu Lei. 2017. Application of the dual frequency induced polarization method to prospecting hidden orebodies in the Charity Well gold deposit of Australia [J]. *Geology and Exploration*, 53 (2): 398 - 405 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kuisong, Zhou Hongxin. 2018. The ore - controlling fault system and its geological significance in Shangshanghe gold belt, Tonghai County in Henan Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 32 (3): 474 - 480 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xing, Yang Qiufang. 2018. Application of comprehensive geophysical prospecting methods to hidden polymetallic ore prospecting in the Miaohuang mining area, Guangxi [J]. *Journal of Geology*, 42 (4): 668 - 674 (in Chinese with English abstract).
- Meng Kai, Liu Weijun, Liu Yang. 2018. The prospecting effect of the IP method in the manganese mining area around Ortokanesh, Xinjiang [J]. *Geology and Exploration*, 54 (S1): 1392 - 1401 (in Chinese with English abstract).
- Niu Junping, Guan Shuyan, Zhang Lishi, Xia Lei, Wang Ziwei, Zhou Jia. 2015. Ore - forming characteristics and prospecting prediction of Naganchu Ag - Cu polymetallic exploration area in Ewenke Banner, Inner Mongolia [J]. *Global Geology*, 34 (4): 961 - 970 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yi, Zheng Wei. 2012. Application of magnetic method in the mining section of Pingchuan iron ore mill in Yanyuan County, Sichuan Province [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 32 (S2): 179 - 182 (in Chinese with English abstract).
- Ren Xirong, Zhao Guoliang, Deng Hui, Wang Huan, Xie Zhifeng. 2015. The application of comprehensive geophysical prospecting methods to the exploration of the Yazigou copper - polymetallic deposit [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39 (5): 885 - 890 (in Chinese with English abstract).
- Sun Renbin, Chu Lixia, Zhao Yijun, Wang Ning, Liu Qiang. 2017. The prospecting effect of the IP method in the manganese mining area around Ortokanesh, Xinjiang [J]. *Geology and Exploration*, 53 (3): 519 - 527 (in Chinese with English abstract).
- Tan Hongyan, Lü Junchao, Liu Guixiang, Ma Shimin, Shu Guanglong, Xi Zhenzhu. 2011. Application of the EH4 audio - frequency magnetotelluric method to search for concealed ore bodies in south - eastern Hubei Province [J]. *Geology and Exploration*, 47 (6): 1133 - 1141 (in Chinese with English abstract).
- Tian Jianlei, Qin Jihua, Zheng Kaiping, Wu Yufeng, Li Qiang. 2014. Application of controllable source audio magnetotelluric sounding in deep prospecting of Ashele copper - zinc deposit [J]. *Mineral Deposits*, 35 (S1): 821 - 822 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qibin, Wang Junheng, Cui Linpei. 1999. New method on prospecting of concealed orebodies [J]. *Geology and Prospecting*, 35 (6): 44 - 47 (in Chinese with English abstract).
- Xu Changkun, Liu Shibao, Zhao Ziji, Zhang Meifeng, Zhang Kaicheng, Liu Jianhua, Zhan Fayu, Huang Chaohui, Zhang Zhongyue, Wang Hongy-

- ing, Zhang Wenjun, Qiao Qiang. 2012. Metallogenic law and prospect direction of iron deposits in the East Kunlun metallogenic belt in Qinghai[J]. Acta Geologica Sinica, 86(10): 1621–1678 (in Chinese with English abstract).
- Xu Chunhua, Qin Xinlong, Cui Jian, Chen Zhenyu, Xiao Xiaoniu, Wu Xiaao, Tang Jun, Zhang Lin. 2018. The thinking about applying borehole logging data to deep ore-prospecting prediction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 42(5): 873–881 (in Chinese with English abstract).
- Xue Mingxuan, Sun Fengyue, Li Bile, Ding Qingfeng. 2012. Discovery, exploration and inspiration of No. 5 gold lode in Dong'an large-scale gold deposit, Heilongjiang[J]. Gold, 33(5): 6–11 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiayong, Teng Jiwen, Lü Qingtian. 2008. Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources[J]. Progress in Geophysics, 23(3): 871–891 (in Chinese with English abstract).
- Yao Zhuosen, Qin Kezhang. 2014. Geophysical exploration for magmatic Cu–Ni sulfide deposits in the orogenic belt: Current status, problems and vistas[J]. Progress in Geophysics, 29(6): 2800–2817 (in Chinese with English abstract).
- Ye Meisheng. 2013. Use of negative magnetic anomalies in the search for iron ore in the Iron Mountain area of Cambodia[J]. Silicon Valley, 124(4): 114–114 (in Chinese with English abstract).
- Yu Shixiang, Zhao Hongzhen, Li Houmin, Yao Liangde, Hong Xuekuan, Yang Zhiliao. 2014. Geological–geophysical prospecting model of deep rich iron ore for No. 2 mining area of the Gongchangling iron deposit, Liaoning, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 29(1): 102–107 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dawei, Ye Manhua, Han Wenrui, Lou Xuejia, Ma Xiaodong. 2012. The non-mineral drilling phenomenon and the reasons in Jiangyan gold mine exploration[J]. Mineral and Exploration, 3(3): 414–415 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qianjin, Yang Jin. 2010. The application of integrated electric methods to the exploration of deep concealed ore bodies[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 34(1): 40–43 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Duo, Chen Anxia, Dong Zaimin, Zhang Bin, Wang Ran, Yang Bin, Zhao Lijun. 2016. Application of the induced polarization method in exploration of a skarnized copper polymetallic deposit in Benxi, Liaoning Province[J]. Geology and Exploration, 52(4): 688–694 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yunman. 2006. Application effects of geophysical prospecting method for hidden deposits in the northeastern Yunnan[J]. Geology and Exploration, 42(3): 81–85 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Weiping, Liu Shihua, Zhu Hongwei, Xu Luping. 2017. Study on the exploration depth of geophysical methods commonly used[J]. Progress in Geophysics, 32(6): 2608–2618 (in Chinese with English abstract).
- 邓波, 李金忠. 2014. 井中物探方法在金属矿勘查中的应用效果[J]. 四川地质学报, 34(2): 276–280.
- 郝兴中, 杨毅恒, 李英平, 王巧云, 王英鹏, 王立功. 2013. 山东苍峰铁矿带预测模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(4): 1136–1142.
- 何显文. 1991. 综合井中物探在某铜矿上的找矿效果[J]. 地质与勘探, (5): 43–46.
- 侯俊富, 索朗顿珠, 张革利, 肖扬, 苏保华, 袁华山. 2019. 激发极化法在西藏昂青银多金属矿勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 10(2): 302–309.
- 贾长顺, 曾庆栋, 徐九华, 刘建明. 2008. 内蒙古白音诺尔铅锌矿褶皱控矿特征及找矿方向[J]. 北京科技大学学报, 30(4): 331–338.
- 李福疆. 2014. 生产勘探在可可塔勒铅锌矿浅议[J]. 新疆有色金属, 37(1): 22–28.
- 李建良. 2016. 井中激发极化法在金牙金矿床普查中的应用[J]. 地质与勘探, 52(5): 924–930.
- 李松生. 1988. 用含矿率法计算右英脉型金矿储量[J]. 地质与勘探, 24(6): 33–36.
- 李希, 高航校, 杨旭, 朱磊. 2017. 双频激化法在澳大利亚 Charity Well 金矿寻找隐伏矿体的应用[J]. 地质与勘探, 53(2): 398–405.
- 刘奎松, 周红霞. 2018. 河南省桐柏上上河金矿带断裂控矿体系及地质意义[J]. 矿产与地质, 32(3): 474–480.
- 刘星, 杨秋访. 2018. 综合物探方法在广西妙皇隐伏多金属矿勘查中的应用[J]. 地质学刊, 42(4): 668–674.
- 蒙凯, 刘卫军, 刘杨. 2018. 激发极化法在新疆奥尔特喀纳什一带锰矿区的找矿效果[J]. 地质与勘探, 54(S1): 1392–1401.
- 牛军平, 关淑艳, 张立仕, 夏磊, 王子维, 周佳. 2015. 内蒙古鄂温克旗那干楚铜多金属勘查区成矿特征与找矿预测[J]. 世界地质, 34(4): 961–970.
- 秦毅, 郑伟. 2012. 磁法在四川盐源县平川铁矿烂纸厂矿段找矿中的应用[J]. 四川地质学报, 32(S2): 179–182.
- 任喜荣, 赵国良, 邓辉, 王欢, 谢志峰. 2015. 综合物探方法在鸭子沟铜多金属矿勘查上的应用[J]. 物探与化探, 39(5): 885–890.
- 孙仁斌, 楚丽霞, 赵绎钧, 王宁, 刘强. 2017. 时间域激发极化法在内蒙古镶黄旗某铅锌多金属矿的应用[J]. 地质与勘探, 53(3): 519–527.
- 谭红艳, 吕骏超, 刘桂香, 马诗敏, 舒广龙, 席振铎. 2011. EH4 音频大地电磁测深方法在鄂东南地区寻找隐伏矿体的应用[J]. 地质与勘探, 47(6): 1133–1141.
- 田建磊, 秦纪华, 郑开平, 吴玉峰, 李强. 2014. 可控源音频大地电磁测深在阿舍勒铜锌矿床深部找矿中的应用[J]. 矿床地质, 35(S1): 821–822.
- 吴其斌, 王君恒, 崔霖沛. 1999. 勘查隐伏金属矿的新方法[J]. 地质与勘探, 35(6): 44–47.
- 许长坤, 刘世宝, 赵子基, 张梅芬, 张开成, 刘建华, 詹发余, 黄朝晖, 张钟月, 王红英, 张文君, 乔强. 2012. 青海省东昆仑成矿带铁铜成矿规律与找矿方向研究[J]. 地质学报, 86(10): 1621–1678.
- 徐春华, 秦新龙, 崔健, 陈振宁, 肖晓牛, 伍宵, 唐俊, 张雷. 2018. 钻孔测井资料在深部找矿预测中的应用—以福建梅仙镇峰岩—谢坑矿区找矿应用为例[J]. 物探与化探, 42(5): 873–881.
- 薛明轩, 孙丰月, 李碧乐, 丁清峰. 2012. 东安大型金矿床 5 号矿脉的

[附中文参考文献]

陈伟军, 蒋鑫, 洪万华. 2016. 内蒙古老国营子金铜矿床地质—地球物理勘查与研究[J]. 地质与勘探, 52(2): 246–250.

- 发现、勘查与启示[J]. 黄金, 33(5): 6-11.
- 严加永, 滕吉文, 吕庆田. 2008. 深部金属矿产资源地球物理勘查与应用[J]. 地球物理学进展, 23(3): 871-891.
- 姚卓森, 秦克章. 2014. 造山带中岩浆铜镍硫化物矿床的地球物理勘探: 现状、问题与展望[J]. 地球物理学进展, 29(6): 2800-2817.
- 叶敏生. 2013. 负强磁异常在柬埔寨铁山地区找铁矿中的运用[J]. 硅谷, 124(4): 114-114.
- 于仕祥, 赵洪振, 李厚民, 姚良德, 洪学宽, 杨志辽. 2014. 弓长岭铁矿二矿区深部富铁矿地质-地球物理找矿模型[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 102-107.

- 张大伟, 叶满华, 韩文锐, 姜雪家, 马晓东. 2012. 江沿金矿勘查中“白眼”现象及原因分析[J]. 矿产勘查, 3(3): 414-415.
- 张前进, 杨进. 2010. 综合电法在深部隐伏矿体勘查中的应用实例[J]. 物探与化探, 34(1): 40-43.
- 周多, 陈安霞, 董再民, 张彬, 王然, 杨宾, 赵利军. 2016. 激发极化法在辽宁本溪某矽卡岩型铜多金属矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 52(4): 688-694.
- 周云满. 2006. 物探方法在滇东北地区寻找隐伏矿床的应用效果[J]. 地质与勘探, 42(3): 81-85.
- 朱卫平, 刘诗华, 朱宏伟, 徐璐平. 2017. 常用地球物理方法勘探深度研究[J]. 地球物理学进展, 32(6): 2608-2618.

The Key to Exploration of Steeply - Dipping Concealed Metal Deposits

MA Xiaodong

(The Academy of Geological Science of Shandong Province, The Key Laboratory of Metal Mineral Metallogenic Geological Process and Resource Utilization of Shandong Province/The Key Laboratory of Metal Mineral Metallogenic Geological Process and Resource Utilization of the Ministry of Natural Resources, Jinan, Shandong 250013)

Abstract: In general the successful rate of exploration drilling at steep - dipping metal deposits is relatively low. Finding out the reason for no - ore occurrence drilling thus enhancing the percentage of ore - occurrence drill holes is the key to the exploration of such metal deposits. This paper addresses this issue by analyzing a case of exploration on a hidden copper deposit with steep dip. The analysis builds on the physical characteristics of the rock and ore, integrated geophysical prospecting of induced - polarization (IP) middle ladder and IP sounding and drilling verification. Results reveal that the inversion of the ore body dipping direction and the heterogeneity of mineralization are two primary factors responsible for the failure of exploration drilling. It is recommended to select suitable electrical, magnetic, gravity and other geophysical scanning and sounding methods to perform surveys in the early stage of exploration under the premise of determining the physical characteristics of deep metal ore bodies as constraints for the interpretation of geophysical data. The preliminary exploration of metal ore mainly judges whether the mineralization of the ore body is uniform or not based on whether there is mineralization in nearby boreholes or whether there is a discontinuity in deep ore - induced anomalies. Meanwhile according to the location of the ore - induced anomalies on geophysical prospecting profiles or ore body dipping features in nearby drilling holes and geophysical prospecting in wells, the judgement is made whether the tendency of the ore body is reversed. In addition, in order to increase the possibility of ore occurrence in drilling holes in steeply inclined concealed metal mines, it is recommended to construct more drilling holes with smaller inclination angles.

Key words: steeply - dipping, concealed metal deposit, exploration, IP intermediate gradient, IP sounding, rock and ore physical properties

