



辽宁抚顺地区铁矿地球物理模型 ——以毛公堡铁矿为例

赵雪娟¹, 孙中任¹, 段会升², 高 铁¹, 孙 钢³

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 烟台东方冶金设计研究院, 山东 烟台 264006; 3. 辽宁省矿产勘查院, 辽宁 沈阳 110000

摘 要: 辽宁抚顺地区铁矿十分丰富, 它们与著名的鞍山铁矿同属辽东吉南成矿带。成矿地层均为鞍山群, 属沉积变质型铁矿, 受变质岩系层状控制明显。鞍山-本溪地区为鞍山群的茨沟岩组、樱桃园岩组; 抚顺-清源地区为鞍山群的石棚岩组、通什村组。它们具有相似的岩性组分和物性特征。通过开展“深部盲矿体勘查技术研究”科研项目, 以抚顺毛公堡铁矿为例, 总结分析抚顺地区铁矿的重磁电物性特征, 建立了地球物理模型。研究认为, 应当打破传统的以磁测为唯一手段的磁铁矿勘查工作模式, 开展重、磁、电联合勘查是可取的、有效的。在水平定位技术方面, 重力方法有其独特的优势; 在垂向定位技术方面可以开展电(磁)测深工作。磁铁矿的极化作用是明显的, 应符合低阻高极化。铁矿重磁电特性是高磁、高密度、高极化、低电阻, 呈“三高一低”的物性特征, 而且品位越高极化率越高。电阻率应不高于 2 000 Ωm , 极化率应不低于 6%, 磁化率不低于 100 000 $\times 10^{-6}$ SI, 密度高于 3.00 $\times 10^3$ kg/m^3 。
关键词: 铁矿; 地球物理模型; 重、磁、电联合勘查; 辽宁抚顺

GEOPHYSICAL MODEL OF IRON DEPOSITS IN FUSHUN REGION OF LIAONING PROVINCE: A Case Study of Maogongpu Iron Mine

ZHAO Xue-juan¹, SUN Zhong-ren¹, DUAN Hui-sheng², GAO Tie¹, SUN Gang³

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Yantai Oriental Metallurgical Design Institute, Yantai 264006, Shandong Province, China;

3. Liaoning Institute of Mineral Exploration, Shenyang 110000, China

Abstract: Fushun region of Liaoning Province is rich in iron deposits, which belongs to the eastern Liaoning-southern Jilin metallogenic belt with the famous Anshan-Benxi iron deposits. The ore-forming strata of both are Anshan Group, belonging to sedimentary-metamorphic type and obviously controlled by the stratified metamorphic rock series. The Anshan-Benxi area is developed with Cigou and Yingtaoyuan complexes of Anshan Group, while the Fushun-Qingyuan area with Shipeng and Tongshicun complexes of Anshan Group, and both share similar lithologic compositions and geophysical characteristics. Based on the research project of exploration technology for deep blind orebodies, taking Maogongpu iron mine in Fushun as an example, the paper analyzes the gravity-magnetic-electrical characteristics of iron ores, and establishes the geophysical model. The research shows that the gravity-magnetic-electric integrated exploration

收稿日期:2021-03-07; 修回日期:2022-03-21. 编辑:张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区重要矿产资源潜力评价”(1212010633901); 辽宁省科技厅项目“深部盲矿体勘查技术研究”(2020210101000271).

作者简介: 赵雪娟(1965—), 女, 高级工程师, 主要从事物探、化探、遥感在地质矿产调查中的应用研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//360342913@qq.com

通信作者: 孙中任(1963—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质勘查中物化遥的应用研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//sunzhongren@mail.cgs.gov.cn

is feasible and effective other than the traditional exploration by single magnetic survey. Gravity method has unique advantages in horizontal positioning, while electrical/magnetic sounding works well in vertical. The polarization of magnetite is obvious, presented as low resistance and high polarization. The gravity-magnetic-electrical characteristics of iron ores are high magnetic, high density, high polarization and low resistance. The higher the grade is, the greater the polarizability is. The resistivity should not be higher than $2\ 000\ \Omega\text{m}$, polarizability no less than 6%, magnetic susceptibility no less than $100\ 000\times 10^{-6}\ \text{SI}$, and the density higher than $3.00\times 10^3\ \text{kg/m}^3$.

Key words: iron deposit; geophysical model; gravity-magnetic-electrical integrated exploration; Fushun region of Liaoning Province

0 前言

抚顺地区是辽宁省的重要铁矿产出地之一^[1-5],抚顺地区铁矿包括东洲区营盘、清原县沿水沟、清原县于家堡子、顺城区前甸子、新宾县五道沟岭、清原县小莱河、新宾县胜利、清原县大莱河、抚顺县郭家堡子、新宾县木奇岭、抚顺县孟家沟、新宾县大和睦、抚顺县毛公堡、抚顺县养树园子、抚顺县救兵、抚顺县傲牛、新宾县玄羊砬子、清原县丁堡、清原县二道沟、清原县王家堡、清原县莲花山、抚顺县上马、新宾县琵琶村等大大小小几十个铁矿^[6],它们与我国著名的鞍本铁矿同属辽东吉南成矿带^[7-8],尽管与鞍本地区大台沟、弓长岭、齐大山等铁矿赋存的层位不尽一致,但它们均属鞍山群,属沉积变质型铁矿^[9-10],受变质岩系层状控制明显,鞍山-本溪地区为鞍山群的茨沟岩组、樱桃园岩组^[11];抚顺-清源地区为鞍山群的石棚岩组、通什村组^[12-13],它们具有相似的岩性组分和物性特征,但一直以来没有一个通用的物性模型,对该区进行地球物理资料处理解释以及矿产评价。

本研究以辽宁省科技厅支持的“深部盲矿体勘查技术研究”科研项目为平台,以抚顺毛公堡铁矿为样本,总结分析辽宁抚顺地区铁矿的重磁电物性特征,建立了地球物理模型,以期对抚顺地区乃至鞍本地区铁矿资料的分析利用以及开展预测评价、勘查开发提供新的视角和思路。

1 区域地质特征

研究区大地构造位置处于中朝准地台(Ⅰ)胶辽台隆(Ⅱ)铁岭-靖宇台拱(Ⅲ)龙岗断凸西侧,抚顺凸起南部浑南太古宙片麻岩卵形构造区,区域内的变质岩系均遭到不同程度的混合岩化作用,区域大面积出露太古宙混合岩,沉积地层不发育,局部地段见有太古

宇鞍山群呈残留体出现于混合岩中,出露地层主要为中太古界鞍山群石棚子组、通什村组变质岩系,岩性主要为角闪混合岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩等残留体,其中通什村组红透山段岩组为混合质含石榴黑云变粒岩,夹黑云角闪变粒岩、磁铁石英岩^[14-16]。

研究区岩浆活动比较频繁,岩体规模巨大,岩脉种类繁多,在苏子河断陷盆地西侧形成了南口前-十花顶子-西大顶子北西向岩浆岩带,在苏子河断裂带和沙河断裂带夹持地块内形成纪家堡子-小桥子-三块石北西向构造岩浆岩带,均受北西向构造控制,岩体均属燕山期岩基型侵入体^[17-20]。

构造主要表现为断裂和褶皱,断裂构造可分为两组:北东向断裂以浑河深大断裂为代表,北西向断裂主要为北东向断裂之次级构造苏子河断裂和沙河断裂,区域内以北西向构造为主要褶皱构造形迹,在通什村组地层中形成较紧闭的同斜褶曲(复背斜和复向斜)构造,北东向构造仅以密集平行排列的微型紧闭褶曲及脉岩确定,主要特征表现为变质变形构造,形成揉皱及褶曲构造^[11, 21-25]。

2 铁矿地质特征

抚顺地区的区域成矿作用属于古亚洲成矿域,华北陆块北缘成矿省,空间上受太古宇层状高级变质基底杂岩系控制,矿床形成地质环境主要是海相沉积,成矿物质主要来源于海底基性火山喷发和陆源物质,中太古代末,古陆壳拉张形成海盆,海底基性-超基性火山喷发,在古老克拉通结晶基底上,首先沉积了陆源黏土质和砂质物质,随后相继出现了硅-铁物质韵律胶体沉积、凝灰质火山沉积,最后以中酸性英安岩、基性玄武岩灰及黏土质沉积物而结束,是一套浅海盆地

相复理石建造, 后经多次不同规模和程度的区域变质变形改造, 成矿物质进一步富集成矿。矿体多呈层状、似层状、透镜状及马鞍状, 延深及延长一般不稳定, 几十米至几百米不等, 厚度变化大。在褶皱轴部变厚, 向两翼逐渐变薄, 甚至拉断。矿石构造大多为条带状或条纹状, 表现为以石英为主的条带(纹)和以磁铁矿为主的条带(纹)相间产出。由于变质程度的不同, 矿石的粒度有一定差异, 变质程度深, 矿石粒度较粗, 反之粒度较细。金属矿物主要为磁铁矿, 次为假象赤铁矿, 还含有少量黄铁矿和磁黄铁矿。铁矿石的自然类型以石英型磁铁矿石为主, 石英闪石型磁铁矿为辅。

3 岩矿石地球物理特征

3.1 区域岩矿石物性特征

通过收集到的研究区太古宙区域地层及磁铁石英岩主要岩矿石标本的物性参数资料^{①②③}, 可以看出, 地层岩石与磁铁矿相比无论磁性还是电性均具有明显的物性差异(表1、2)。

1) 磁性: 太古宙片麻岩的磁化率算术平均值为

457×10^{-6} SI, 变化范围 $37 \times 10^{-6} \sim 1257 \times 10^{-6}$ SI; 剩磁平均值为 18×10^{-3} A/m, 变化范围 $0 \sim 380 \times 10^{-3}$ A/m。磁铁石英岩的磁化率算术平均值为 $195\ 225 \times 10^{-6}$ SI, 变化范围 $98\ 000 \times 10^{-6} \sim 199\ 900 \times 10^{-6}$ SI; 剩磁平均值为 $7\ 091 \times 10^{-3}$ A/m, 变化范围 $3\ 367 \times 10^{-3} \sim 10\ 509 \times 10^{-3}$ A/m。两者差异巨大, 能够形成明显的磁异常。

密度: 太古宙片麻岩的密度算术平均值为 2.69×10^3 kg/m³, 变化范围 $2.58 \times 10^3 \sim 2.98 \times 10^3$ kg/m³。磁铁石英岩的密度算术平均值为 3.40×10^3 kg/m³, 变化范围 $3.17 \times 10^3 \sim 3.57 \times 10^3$ kg/m³。两者具有约 0.7×10^3 kg/m³ 的密度差, 磁铁矿能够形成明显的重力高异常。

电阻率: 太古宙片麻岩的电阻率算术平均值为 $4\ 907\ \Omega\text{m}$, 变化范围 $577 \sim 12\ 181\ \Omega\text{m}$ 。磁铁石英岩的磁化率算术平均值为 $1\ 224\ \Omega\text{m}$, 变化范围 $335 \sim 4\ 248\ \Omega\text{m}$ 。矿体相对岩层呈相对低阻。

极化率: 太古宙片麻岩的极化率算术平均值为 2.48%, 变化范围 1.34%~3.32%。磁铁石英岩的极化率算术平均值为 19.1%, 变化范围 6.5%~33.4%。两者差异约 10 倍, 能够形成明显的激电异常。

表 1 太古宙片麻岩物性参数测定表
Table 1 Physical parameters of Archean gneiss

样品编号	磁化率/ 10^{-6} SI	剩磁/(10^{-3} A/m)	剩磁偏角/(°)	剩磁化倾角/(°)	密度/(g/cm ³)	电阻率/ Ωm	极化率/%
P1-1-1	86.3	81.8	122.4	49.0	2.58	2122	2.12
P1-2-1	896.7	380.8	-30.2	-12.4	2.61	2571	2.51
P1-3-1	210.0	211.1	29.7	61.0	2.79	2830	2.09
P1-4-1	48.3	0.2	6.3	-19.2	2.66	12181	2.6
P1-5-1	46.7	0.1	197.8	68.7	2.65	9029	2.40
P1-6-1	44.1	0.2	112.2	38.0	2.65	8137	2.49
P1-7-1	55.0	0.1	157.3	74.3	2.64	6975	2.80
P1-8-1	929.2	0.6	309.7	37.2	2.73	577	1.99
P1-9-1	946.3	0.7	321.1	47.2	2.69	1225	2.79
P1-10-1	390.2	4.7	355.1	37.4	2.78	5897	2.93
算术平均值	57	18			2.69	4907	2.48
变化范围	37~1257	0~380			2.58~2.98	577~12181	1.34~3.32

①王成龙,等. 辽宁省矿产资源潜力评价重力资料应用研究成果报告. 2013.
②王成龙,等. 辽宁省矿产资源潜力评价磁测资料应用研究成果报告. 2013.
③王成龙,等. 辽宁省矿产资源潜力评价磁测资料应用综合研究报告. 2013.

表 2 太古宙磁铁矿石岩物性参数测定表

Table 2 Physical parameters of Archean magnetic quartzite

样品编号	磁化率/ 10 ⁻⁶ SI	剩磁/ (10 ⁻³ A/m)	密度/ (g/cm ³)	电阻率/ Ωm	极化率/ %
31-1-1	199900.1	10440.6	3.17	1778	29.9
31-1-2	196686.8	9868.9	3.36	3061	8.64
31-1-3	198213.2	1215.6	3.50	593	33.4
31-2-1	199527.7	9922.3	3.32	2188	37.1
31-2-2	197289.3	10509.1	3.54	575	51.4
31-2-3	199698.1	9970.9	3.32	4248	10.81
31-3-1	192068.2	8543.4	3.37	1774	10.21
31-3-2	198578.6	7640.4	3.35	1563	11.51
31-3-3	192178.1	9079.7	3.25	2677	31.8
31-4-1	89701.2	7689.6	3.67	1568.3	7.68
31-4-2	167890.5	5632.5	3.26	678.9	12.3
31-4-3	176890.2	6783.2	3.80	1235.1	8.79
31-5-1	116789.2	6573.2	3.52	890.5	6.57
31-5-2	98000.3	3681.6	3.57	357.6	11.5
31-5-3	156789.1	7890.3	3.32	578.3	8.89
31-6-1	112567.5	5237.7	3.37	675.2	23.5
31-6-2	98006.5	6756.2	3.36	1276.8	22.7
31-7-1	98707.5	5231.2	3.25	335.2	17.8
31-7-2	879652.5	5789.2	3.35	536.7	23.7
算术 平均值	195225	7091	3.40	1224	19.1
变化范围	98000~199900	3367~10509	3.17~3.57	335~4248	6.5~33.4

根据上述成果分析,磁铁矿体相对岩层物性差异明显,能够形成明显的异常,具有高磁、高密度、低阻高极化的异常特征。

表 4 毛公堡矿区磁铁矿石磁化率统计表

Table 4 Magnetic susceptibility of magnetite ores in Maogongpu mining area

均值	样品数	标准差	极小值	极大值	分组中值	中值	方差	几何均值	调和均值
31.737	19	17.6756	10.3	74.0	28.900	28.900	312.428	26.969	22.683

单位:10⁻³ SI.

表 5 毛公堡矿区磁铁矿石密度参数统计表

Table 5 Density parameters of magnetite ores in Maogong mining area

均值	样品数	标准差	极小值	极大值	方差	偏度	调和均值	几何均值	中值
2.9674	13	0.05339	2.89	3.08	0.003	0.582	2.9666	2.9670	2.9600

单位:10³ kg/m³.

3.2 毛公堡矿区的物性特征

根据前人统计抚顺毛公堡矿区岩(矿)石磁参数(表 3)分析,矿区内磁铁矿的磁化率最高,平均值为 28 581×10⁻⁶ SI;含磁铁矿的条纹状斜长角闪岩(弱磁)磁化率变化范围 85×10⁻⁶~1 092×10⁻⁶ SI,算术平均值为 302×10⁻⁶ SI;构造破碎带的磁化率变化范围 2×10⁻⁶~184×10⁻⁶ SI,算术平均值为 73×10⁻⁶ SI;其他岩石的磁化率算术平均值一般在为 5×10⁻⁶~20×10⁻⁶ SI,表现为无磁或低磁性.由此可见磁铁矿与其他岩石存在明显磁性差异,该地区具备运用磁法寻找磁铁矿的物理前提。

表 3 毛公堡矿区岩(矿)石磁参数统计表

Table 3 Magnetic parameters of rocks/ores in Maogongpu mining area

岩矿石名称	标本数	最大值/ 10 ⁻⁶ SI	最小值/ 10 ⁻⁶ SI	平均值/ 10 ⁻⁶ SI
灰、灰白色细粒斜长角闪岩	27	76	1.76	17.54
深灰-浅灰色斜长角闪岩	28	112	1.23	17.39
辉长岩	76	69.2	0.74	10.85
肉红色花岗岩	114	46.4	0.38	4.56
深灰色花岗闪长岩	34	92.7	1.05	24.74
破碎带	4	184	2.06	73.06
条纹状弱磁性斜长角闪岩	131	1092	85	301.62
磁铁矿石英岩	21	74000	300	28581.0

注:磁铁矿石英岩为野外样品,其余为钻孔标本。

3.3 毛公堡矿区与区域性物性资料对比

矿区磁铁矿石标本测试结果见表 4、5。根据上述成果分析,毛公堡矿区磁铁矿体相对岩层物性差异明显,能够形成明显的异常,具有高磁、高密度、低阻、高

极化的异常特征。

对照上述岩矿石物性资料可以得出:1)本项目研究区的岩(矿)石的磁化率相对较低;2)研究区内没有达到工业品位的矿体存在;3)一般而言,鞍本地区磁铁矿磁化率应当不低于 0.1 SI, 密度不低于 $3.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 电阻率不高于 $4000 \text{ } \Omega\text{m}$, 极化率不低于 6.5%。

4 问题提出

在多年的勘探实践中,笔者发现磁铁矿(化)无论是重力、磁力、或者电(磁)测深等地球物理方法都有很好的异常显示。钻孔验证磁铁矿(化)体无论是形态,还是其空间位置都与电测深圈定的异常吻合。但是施钻以后,原来推测的异常体化学品位预测不准,并没有预期那么高,仅属矿化(约 10%)水平。如何利用重磁电异常特征判断磁铁矿(化)体的品位,或者说判断其是否具有开采价值就是目前面临的重要问题。

传统上一直认为“磁测+钻探”是这类矿产的首选勘探模式,甚至是唯一模式。为了解决如何利用重、磁、电联合勘查,不仅推断出磁铁矿(化)体的空间位置,还要判断其可否具有可采品位的问题,我们首先对项目实施的 ZK1 钻孔岩心做了磁、电连续扫描。

4.1 磁性扫描

相对强磁性地段以岩心间距 0.7 m 为测量单元,无磁性或弱磁性段每钻探回次为一测量单元,实行点测,3 次取均值的方法,共测量标本 414 个(图 1)。

从钻孔磁化率扫描结果看,矿化段与非矿化段磁化率差异明显。磁化段一般变化范围为 $50.3 \times 10^{-3} \sim 600.0 \times 10^{-3} \text{ SI}$, 一般值为 $220.0 \times 10^{-3} \text{ SI}$ 。在勘查范围内地层分层明显。自地表向下至 130 m 为有磁性地层,结合工作区地质条件可知该层为斜长角闪岩混合岩区。斜长角闪岩混合岩层磁性不匀,深度 50 m 左右有弱磁层,100 m 左右的中高磁性层位磁铁矿品位可能较高,但厚度不大。130 m 以深磁性均不强,基本为弱磁岩性层,结合地质观察该层为花岗岩层。130 m 以深的花岗岩层有个别段呈尖峰状中低磁性层如 250 m、460 m、800 m,与花岗岩层夹斜长角闪岩薄层有关。磁化率最强的标本也远不及前人矿区磁铁矿磁化率的平均值($28\ 581 \times 10^{-6} \text{ SI}$)。

4.2 电性扫描

电性扫描为兼顾岩性变化,不针对磁铁矿(化)加

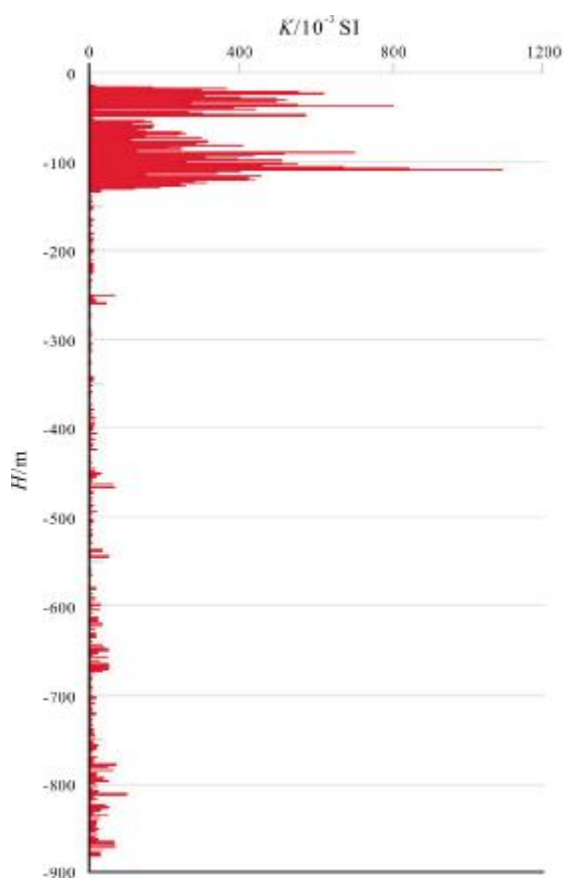


图 1 验证孔磁化率柱状图

Fig. 1 Magnetic susceptibility histogram of verification borehole

密,近似等间隔取样,点间隔 4.5 m,完成电性测量标本 191 个。

从岩心电阻率扫描柱状图(图 2)可见,钻孔岩心整体为高阻反应。电阻率算术平均值为 $3\ 458.09 \text{ } \Omega\text{m}$, 变化范围在 $23.90 \sim 11\ 192.62 \text{ } \Omega\text{m}$, 这一结果与区域资料完全相符。电性层也有较明显分层。自地表向下至 190 m 深度为高阻层,190~390 m 为相对低阻,390 m 至终孔一般为相对中等阻值。磁性分层在 130 m 处,电性层也是在此分界,只是在电阻率柱状图上 130 m 很难视为分层,其下仍为高阻层。可能的原因是 130~190 m 磁铁矿石含量变低了,蚀变没有太多的变化。斜长石等造岩矿物含量也没有更多的变化,甚至有增无减。电阻率平均值为 $6\ 862.11 \text{ } \Omega\text{m}$, 变化范围为 $5\ 268.66 \sim 9\ 198.70 \text{ } \Omega\text{m}$ 。电性在 390 m 左右低阻分层与磁分层吻合的非常好,说明这一层位是岩性的分界线。电阻率平均值为 $1\ 211.66 \text{ } \Omega\text{m}$, 变化范围为 $440.74 \sim 1\ 740.04 \text{ } \Omega\text{m}$ 。

自 390 m 至孔底电阻率曲线上分异不大,电阻

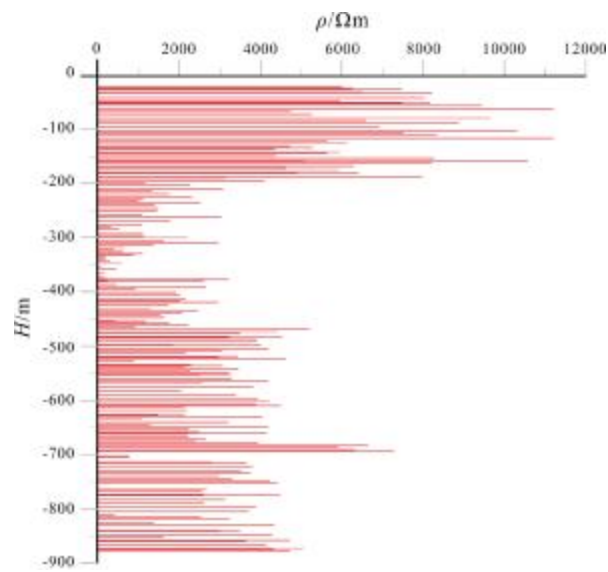


图 2 验证孔电阻率柱状图

Fig. 2 Resistivity histogram of verification borehole

率平均值为 3 039.43 Ωm ,变化范围为 2 332.00~3 928.74 Ωm .从 0~130 m 有磁异常,但磁化率不强,从电阻率 130 m 恰恰不是明显分界层这一点看,即使是有磁异常,但测深电阻率异常强度不理想也不能形成高品位磁铁矿,即单纯利用磁异常或电阻率异常区分矿石品位都是难以成立的结论.

极化率柱状图(图 3)则有着另一种特征:整孔岩心几乎无法看出孰高孰低,结合电阻率柱状图勉强能将 190~390 m 相对低阻段划为低极化率段.这是因为整孔均为低极化率,极化率算术平均值为 1.29%,变化范围在 0.16%~4.67%,这与前人测得磁铁矿极化率算术平均值为 19.1%,变化范围在 6.5%~33.4%的结果大相径庭.

由此初步判断,整孔矿化段品位很难达到磁铁矿的程度,而且蚀变等地质作用也不甚发育.

5 问题讨论

由于抚顺铁矿区矿与非矿(包括矿化)磁参数的区别,而探明目标体空间位置的重要手段就是电测深,探讨矿与非矿(包括矿化)电性特征就成了首要问题.为此,我们在矿区达工业品位的岩心上取标本 4 个特检样(如表 6).

由表 6 可见,达到工业品位的样品电阻率为 800~3 000 Ωm ,边界品位的样品电阻率在 5 000 Ωm 左右,

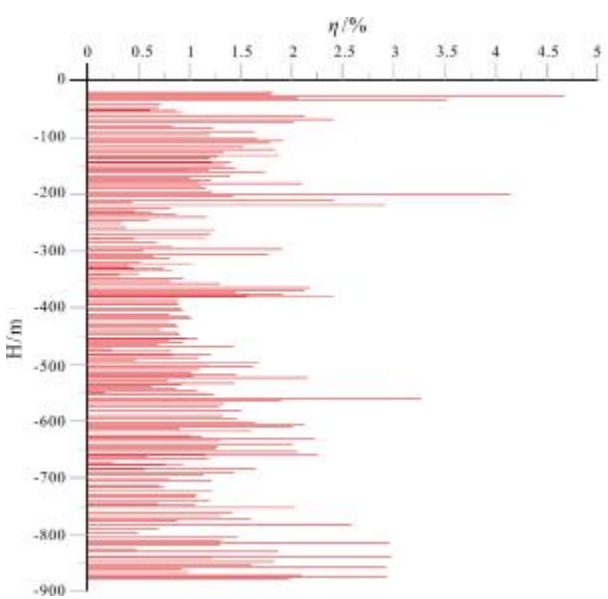


图 3 验证孔极化率柱状图

Fig. 3 Polarizability histogram of verification borehole

表 6 毛公堡矿区磁铁矿标本电参数统计表

Table 6 Electrical parameters of magnetite samples from Maogong mining area

编号	I/ μA	V/ μV	K	$\eta/\%$	$\rho/\Omega\text{m}$
W1	35	1034.13	33.49	18.67	989.61
W2	7	3638.90	9.83	5.05	5109.83
W3	12	1730.57	18.09	7.52	2608.32
W4	29	2672.12	9.28	31.14	854.62

达到工业品位的样品极化率均高于 6%,个别矿段极化率大于 10%.因此,磁铁矿石有“低阻高极化”的特征.而且,随磁铁矿品位降低,极化率变低,电阻率升高.一般而言,达到工业品位磁铁矿电阻率应不高于 2 000 Ωm ,极化率应不低于 6%.这样就很好地解释了本项目实施之初利用重、磁、电刻画矿体空间位置准确,但矿石品位不能满足开采的问题.

据此,提出研究区磁铁矿地球物理(重磁电)物性模型:高磁化率、高密度、高极化率、低电阻率,即“三高一低”的物性模型.而地球物理(重磁电)异常为高的重、磁平面异常和矿体相应深度的高极化、相对低阻异常.

6 结论

研究认为,至少在抚顺地区(其他地区也极具借鉴意义)应当打破传统的以磁测为唯一手段开展磁铁矿

勘查的工作模式. 开展重、磁、电联合勘查是可取的, 有效的. 在水平定位技术方面重力方法有其独特的优势; 在垂向定位技术方面可以开展电(磁)测深工作. 磁铁矿的极化作用是明显的, 应符合低阻高极化. 磁铁矿重磁电特性是高磁、高密度、高极化、低电阻, 呈“三高一低”的物性模型特征, 而且品位越高极化率越高. 电阻率应不高于 $2\,000\ \Omega\text{m}$, 极化率应不低于 6%, 磁化率不低于 $100\,000\times 10^{-6}\ \text{SI}$, 密度应高于 $3.00\times 10^3\ \text{kg/m}^3$.

参考文献(References):

- [1] 沈其韩. 鞍山式铁深部找矿整装勘查中应注意的若干问题[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1331–1334.
Shen Q H. Some issues about the deep prospecting and integrated exploration of Anshan type iron deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1331–1334. (in Chinese)
- [2] 沈保丰, 翟安民, 苗培森, 等. 华北陆块铁矿床地质特征和资源潜力展望[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(4): 244–252.
Shen B F, Zhai A M, Miao P S, et al. Geological character and potential resources of iron deposits in the North China Block[J]. Geological Survey and Research, 2006, 29(4): 244–252.
- [3] 张朋, 乔树岩, 姜海洋, 等. 辽宁鞍山地区铁矿产规律与资源潜力分析[J]. 地质与资源, 2012, 21(1): 134–138.
Zhang P, Qiao S Y, Jiang H Y, et al. Metallogenic regularities and resources potential of the iron deposits in Anshan-Benxi area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(1): 134–138.
- [4] 刘军, 靳淑韵. 中国铁矿资源的现状与对策[J]. 中国矿业, 2009, 18(12): 1–2, 19.
Liu J, Jin S Y. The actuality and countermeasure of the iron ore resource in China[J]. China Mining Magazine, 2009, 18(12): 1–2, 19.
- [5] 王岩, 王林林. 辽宁鞍山地区铁矿产规律与资源潜力分析[J]. 装饰装修天地, 2015, 18(S2): 144.
Wang Y, Wang L L. Analysis on metallogenic regularity and resource potential of iron deposit in Anshan-Benxi area, Liaoning Province[J]. Decoration Refurbishment Centre, 2015, 18(S2): 144. (in Chinese)
- [6] 谢忠. 辽宁省清原县大莱河铁矿床地质特征[J]. 地质与资源, 2016, 25(3): 265–268.
Xie Z. Geological characteristics of the Dalaihe iron deposit in Qingyuan County, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2016, 25(3): 265–268.
- [7] 李士江, 全贵喜. 鞍山–本溪地区含铁变质地层的划分与对比[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(2): 107–111.
Li S J, Quan G X. Stratigraphic division and correlation of iron ore-bearing metamorphic rocks in Anshan-Benxi area[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2010, 25(2): 107–111.
- [8] 于凯君. 辽宁鞍山地区铁矿床地质特征及成矿预测[J]. 勘察测绘, 2017(12): 262.
Yu K J. Geological characteristics and metallogenic prediction of iron deposits in Anshan-Benxi area, Liaoning Province[J]. Investigation and Mapping, 2017(12): 262. (in Chinese)
- [9] 刘陆山, 付海涛, 刘忠元, 等. 鞍山–本溪地区富铁矿分布规律及成因探讨[J]. 地质与资源, 2015, 24(4): 341–346.
Liu L S, Fu H T, Liu Z Y, et al. Distribution and genesis of high-grade iron ore in Anshan-Benxi region[J]. Geology and Resources, 2015, 24(4): 341–346.
- [10] 王恩德, 夏建明, 赵纯福, 等. 弓长岭铁矿床磁铁矿形成机制探讨[J]. 地质学报, 2012, 86(11): 1761–1772.
Wang E D, Xia J M, Zhao C F, et al. Forming mechanism of high-grade magnetite bodies in Gongchangling, Liaoning Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1761–1772.
- [11] 王守伦. 鞍山地区鞍山群富铁矿成因类型的讨论[J]. 矿床地质, 1986, 5(4): 14–22.
Wang S L. The genetic types of rich iron deposits of Anshan Group in Anshan-Benxi area[J]. Mineral Deposits, 1986, 5(4): 14–22.
- [12] 卢崇海, 张耀华, 奚锐, 等. 辽宁鞍山–抚顺地区新太古代含铁建造层位对比及形成时代讨论[J]. 化工矿产地质, 2013, 35(4): 193–200.
Lu C H, Zhang Y H, Xi R, et al. Discussion on Archaean iron Formation strata comparison and its forming era in Anshan-Benxi-Fushun area of Liaoning[J]. Geology of Chemical Minerals, 2013, 35(4): 193–200.
- [13] 李延河, 张增杰, 侯可军, 等. 辽宁鞍山地区沉积变质型富铁矿的成因: Fe、Si、O、S 同位素证据[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2351–2372.
Li Y H, Zhang Z J, Hou K J, et al. The genesis of Gongchangling high-grade-iron ores, Anshan-Benxi area, Liaoning Province, NE China: Evidence from Fe-Si-O-S isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2351–2372.
- [14] 洪秀伟, 庞宏伟, 刘学文, 等. 辽宁本溪大台沟铁矿地质特征[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1426–1433.
Hong X W, Pang H W, Liu X W, et al. Geological characteristics of the Dataigou iron deposit in Benxi, Liaoning Province[J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1426–1433.
- [15] 张璟, 邵军, 鲍庆中, 等. 辽宁本溪大台沟铁矿地质特征及找矿标志[J]. 地质与资源, 2014, 23(4): 343–351, 356.
Zhang J, Shao J, Bao Q Z, et al. Geological characteristics and prospecting indicators for Dataigou iron deposit in Benxi, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2014, 23(4): 343–351, 356.
- [16] 张朋, 彭明生, 欧阳兆灼, 等. 辽宁鞍山地区铁矿床地质特征及找矿标志分析[J]. 地质与资源, 2012, 21(6): 516–521.
Zhang P, Peng M S, Ouyang Z Z, et al. Geological characteristics and ore-searching guides of the iron deposits in Anshan-Benxi area,

- Liaoning Province[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(6): 516–521.
- [17] 杨秀清, 李厚民, 李立兴, 等. 辽宁鞍山-本溪地区铁矿床流体包裹体和硫、氢、氧同位素特征研究[J]. *地质学报*, 2014, 88(10): 1917–1931.
- Yang X Q, Li H M, Li L X, et al. Characteristics of fluid inclusion, S, H and O isotope of iron deposit in Anshan-Benxi area, Liaoning Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(10): 1917–1931.
- [18] 付海涛, 刘陆山, 冷文芳, 等. 鞍山-本溪南部隐伏花岗岩体地质特征[J]. *地质找矿论丛*, 2013, 28(2): 176–180.
- Fu H T, Liu L S, Leng W F, et al. Geological characteristics of concealed granitic body in the Anshan-Benxi region[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2013, 28(2): 176–180.
- [19] 周世泰. 鞍山-本溪地区鞍山群变质岩岩石化学研究及条带状铁矿的成矿条件[J]. *中国地质科学院院报*, 1987, 16(2): 139–153.
- Zhou S T. The petrochemical study of the Archean banded iron deposit in Anshan-Benxi district, Liaoning Province [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1987, 16(2): 139–153.
- [20] 刘明军, 李厚民, 李立兴, 等. 辽宁弓长岭铁矿床二矿区类矽卡岩的岩石矿物学特征[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(6): 1067–1076.
- Liu M J, Li H M, Li L X, et al. Petrological and mineralogical characteristics of the skarnoid in No. 2 mining area of the Gongchangling iron deposit, Liaoning, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(6): 1067–1076.
- [21] 陈永生, 葛志广, 付方华. 鞍山深部铁矿综合地球物理研究[J]. *工程地球物理学报*, 2017, 14(2): 180–184.
- Chen Y S, Ge Z G, Fu F H. Comprehensive geophysical study on deep iron ore in Anshan area [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2017, 14(2): 180–184.
- [22] 付海涛. 鞍本地区 EW 向深大断裂地质特征[J]. *地质找矿论丛*, 2014, 29(4): 471–479.
- Fu H T. Geological characteristics of huge and deep EW fracture at Anshan-Benxi area [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2014, 29(4): 471–479.
- [23] 刘明军, 李厚民, 薛春纪, 等. 辽宁弓长岭铁矿床二矿区矿石及类矽卡岩的地球化学特征及其找矿意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(10): 1889–1903.
- Liu M J, Li H M, Xue C J, et al. Geochemical characteristics and prospecting significance of ores and skarnoid of No. 2 diggings of the Gongchangling iron deposit in Liaoning [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(10): 1889–1903.
- [24] 刘军, 靳淑韵. 辽宁弓长岭铁矿磁铁矿富矿的成因研究[J]. *现代地质*, 2010, 24(1): 80–88.
- Liu J, Jin S Y. Genesis study of magnetite-rich ore in Gongchangling iron deposit, Liaoning [J]. *Geoscience*, 2010, 24(1): 80–88.
- [25] 李鸿业, 赵秀德. 鞍本地区鞍山式铁矿区地质构造[J]. *前寒武纪研究进展*, 1999, 22(3): 22–29.
- Li H Y, Zhao X D. Geological structure of BIF mining district in Anshan-Benxi area, Liaoning Province [J]. *Progress in Precambrian Research*, 1999, 22(3): 22–29.

(上接第 486 页/Continued from Page 486)

- [13] Mackenzie J S, Ringrose P S. Use of SEASAT SAR imagery for geological mapping in a volcanic terrain: Askja Caldera, Iceland [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(2): 181–194.
- [14] Guo H D, Liao J J, Wang C L, et al. Use of multifrequency, multipolarization shuttle imaging radar for volcano mapping in the Kunlun Mountains of Western China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(2): 364–374.
- [15] 倪卓娅. 基于 SAR 影像的岩性分类及其在地质上的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- Ni Z Y. Research on lithological classification using SAR image and its application on geology [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [16] 刘恺, 张进江, 葛茂卉, 等. 中生代兴蒙造山带东缘的古太平洋板块俯冲[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(6): 1098–1108.
- Liu K, Zhang J J, Ge M H, et al. Mesozoic subduction of the Pale-Pacific plate along the eastern margin of the Xing-Meng Orogenic Belt [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(6): 1098–1108.
- [17] Qi Z X, Yeh A G O, Li X, et al. A novel algorithm for land use and land cover classification using RADARSAT-2 polarimetric SAR data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 21–39.
- [18] 陈启浩, 聂宇靓, 李林林, 等. 极化分解后多纹理特征的建筑物损毁评估[J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 955–965.
- Chen Q H, Nie Y L, Li L L, et al. Buildings damage assessment using texture features of polarization decomposition components [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 955–965.
- [19] 刘修国, 陈奇, 陈启浩, 等. 综合多特征的高分辨率极化 SAR 图像分割[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(3): 553–559.
- Liu X G, Chen Q, Chen Q H, et al. Integrated multi-feature segmentation method for high resolution polarimetric SAR images [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 553–559.