

doi:10.3799/dqkx.2016.054

综合找矿方法在东阿单庄 BIF 型铁矿床勘查中的应用

张 岩^{1,2,3}, 张尚坤^{1,2,3}, 于学峰^{1,2,3*}, 单 伟^{1,2,3}, 陈文韬^{1,2,3}, 闫 诚^{1,2,3}, 郭 朋⁴, 李小伟⁵

1. 国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东济南 250013

2. 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 山东济南 250013

3. 山东省地质科学研究院, 山东济南 250013

4. 山东省物化探勘查院, 山东济南 250013

5. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要:高精度磁测和井中三分量磁测是行之有效的磁法勘探手段,对于隐伏区BIF型铁矿床勘查更具意义。单庄铁矿是山东省在黄河以北覆盖区发现的一处大—中型条带状磁铁石英岩矿床(banded iron formation,简称BIF),矿体赋存于晚太古代泰山岩群山草峪组,目前已发现矿体20余个,矿体倾向南西,倾角为56°~70°,TFe平均品位为28%,mFe平均品位为22%。以单庄铁矿勘查为例,介绍了在覆盖区BIF型铁矿床勘查中的综合找矿方法。在充分了解区域地质概况和航磁异常等物探成果的基础上,在成矿有利地段实施高精度磁测和磁测剖面测量,选取最优位置进行钻孔验证。本项目的实施结果表明,在钻探过程中或终孔结束前,要重视井中三分量磁测的重要性,因为它对于井下盲矿体的圈定和井中旁侧异常的指示将会起到至关重要的作用。

关键词:磁法勘探;铁矿;单庄;东阿;山东;矿床地质。

中图分类号: P618.31

文章编号: 1000-2383(2016)04-0655-09

收稿日期: 2015-09-12

Application of Integrated Prospecting Method on Shanzhuang BIF Deposit in Dong'e County

Zhang Yan^{1,2,3}, Zhang Shangkun^{1,2,3}, Yu Xuefeng^{1,2,3*}, Shan Wei^{1,2,3}, Chen Wentao^{1,2,3},
Yan Cheng^{1,2,3}, Guo Peng⁴, Li Xiaowei⁵

1. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization, Ministry of Land and Resources, Jinan 250013, China

2. Shandong Key Laboratory of Mineralization Geological Processes and Resource Utilization in Metallic Minerals, Jinan 250013, China

3. Shandong Geological Sciences Institute, Jinan 250013, China

4. Shandong Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Jinan 250013, China

5. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: High resolution magnetic survey and borehole triple-component magnetometry are the effective magetic prospecting methods, especially much more significative for the exploration of banded iron formation (BIF) type iron deposits around coverage region. The Shanzhuang iron deposit, located in the covered regions of north of the Yellow River in Shandong Province, is a medium- to large- scale magnetite-quartzite type iron deposit. The deposit includes more than 20 iron bodies, which occur in the Shancaoyu Formation of the Neoproterozoic Taishan Group. The iron bodies dip to the southwest at 56°—70°. Average grade is about 28% for the total iron, and 22% for the magnetic iron. Taking the prospecting of the Shanzhuang iron deposit as an example, it aims to introduce an integrated prospecting method for BIF iron deposits in covered regions. Based on regional geological and geophysical characteristics, such as aeromagnetic anomaly, a high-resolution magnetic survey and profile measurement in favorable prospecting places were carried out, and the best drilling spot is chosen. It is found in the study that the borehole triple-component magnetometry during drilling and right before ending of drilling should be paid special attention,

基金项目:山东省地质勘查项目(No.鲁勘字[2014]9号);山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室项目(No.2014001);山东省“泰山学者”建设工程项目(No.鲁政办字[2013]122号)。

作者简介:张岩(1985—),男,硕士研究生,工程师,主要从事固体矿产资源勘查、矿床学的研究工作.E-mail: sddkyzy@163.com

* 通讯作者:于学峰,E-mail: xfengy@sohu.com

引用格式:张岩,张尚坤,于学峰,等,2016.综合找矿方法在东阿单庄 BIF 型铁矿床勘查中的应用.地球科学,41(4):655—663.

which could not only help find blind ore bodies, but also indicate abnormality around the borehole.

Key words: magnetic prospecting; iron deposit; Shanzhuang; Dong'e County; Shandong Province; ore deposit geology.

0 引言

产在前寒武纪古老变质岩系中的沉积变质型铁矿(banded iron formation, 简称 BIF), 在我国称为鞍山式铁矿, 是全球最重要的铁矿工业类型(沈其韩, 2012). 我国的鞍山式铁矿主要产在华北板块 25 亿年前的太古代地层中, 主要分布在鞍山—本溪地区、冀东地区、鲁西等地(沈其韩等, 2009; 万渝生等, 2012; 张连昌等, 2012; 杨秀清等, 2014). 山东省东阿县单庄铁矿即为鲁西地区近年来发现的一个典型 BIF 型矿床, 实现了山东省黄河以北隐伏地区铁矿找矿的新突破.

我国金属与非金属矿物探经过 60 a 的发展, 物探方法由过去的 4 种增加至现今的 40 余种. 目前已建立起第 2 代航空物探系列、地面高精度重力和磁勘查系列、综合电法系列、综合核物探系列以及地下物探和测井系列(孙文珂等, 1997). 其中磁法勘探在地面、航空与海洋磁测工作方面, 磁力仪研制与生产方面, 磁异常处理与转换技术方面, 磁异常解释理论与方法方面, 岩石磁性研究方面, 基础地质研究、固体矿产勘查、油气勘查和其他领域中的应用方面取得了很大的进展(管志宁, 1997; 刘双等, 2014; 张壹等, 2015).

随着矿产勘查工作的不断推进, 浅表矿产日益减少, 深部隐伏矿已成为当前矿产勘查工作的主要对象(张前进和杨进, 2010), 危机矿山深部找矿迫在眉睫, 但是这些矿体埋深大, 产生磁异常较弱, 因此需要对重磁数据进行精细化处理和解释, 为危机矿山深部和外围找矿提供重要参考(刘天佑等, 2007; 李淑玲等, 2007). 鲁西南覆盖区沉积变质型铁矿分布广泛, 前人曾在该区完成了面积性的航磁、地质等勘查工作, 由于缺乏对该区系统性、综合性的地质工作, 铁矿勘查工作一直没有取得实质性进展. 在综合分析以往地质资料的基础上, 2008 年以来, 山东省地质科学研究院项目组在东阿县单庄地区开展了铁矿勘查工作, 在磁法等物探手段的基础上, 结合钻探验证, 取得了较好的找矿效果. 因此, 磁法勘探在寻找隐伏磁铁矿体方面效果显著, 是铁矿勘查的基本方法, 也是矿产预测和找矿(尤其是隐伏矿的预测)中的重要手段和有效方法之一(娄德波等, 2008). 同时, 在钻探过程中, 进行井中磁测非常重

要, 可以揭露深部和旁侧异常, 为下一步的钻孔布设提供重要依据.

本文是笔者在综合该区以往地质成果, 结合近年在该区开展铁矿找矿工作基础上完成的, 是综合找矿方法在东阿单庄 BIF 型铁矿床勘查中的典型实例, 也是井中三分量磁测在预测 BIF 型铁矿床深部盲矿体方面的成功实例, 具有典型的生产实用性和科学研究价值.

1 矿区地质特征

该区大地构造位置地处华北板块(I)鲁西隆起区(II)鲁中隆起(III)泰山—济南断隆(IV)乐平铺潜凹陷(V)(张增奇等, 2014), 属黄河冲积平原区. 区内均为第四系覆盖(图 1), 厚度为 87~252 m. 其下为奥陶纪、寒武纪地层, 主要岩性为白云岩、灰岩、页岩、粉砂岩等. 地层倾向为 340°~35°, 倾角为 3°~6°, 产状较平缓. 含矿地层为新太古代泰山岩群山草峪组, 该套地层为一套中深变质岩系, 主要岩石类型为黑云变粒岩、赤铁矿化角闪石英片岩、斜长角闪岩等, 含矿岩石为角闪磁铁石英岩、含石榴角闪磁铁石英岩、赤铁石英岩、磁铁黑云变粒岩等(岩石宏、微观

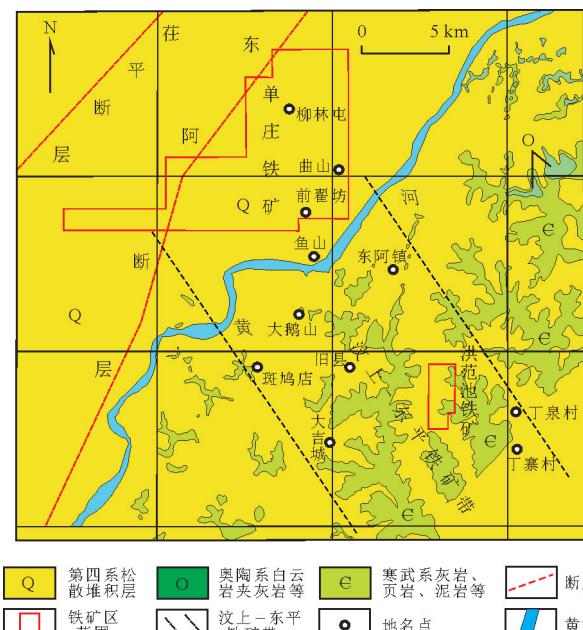


图 1 单庄铁矿区域地质图

Fig.1 The geological sketch of the Shanzhuang iron deposit

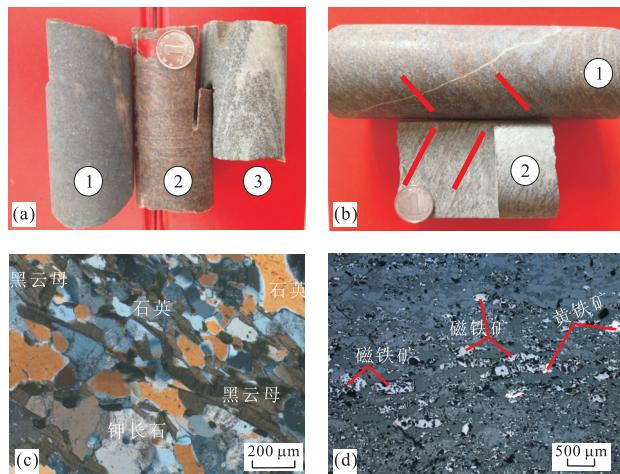


图 2 单庄铁矿主要矿石和围岩宏观和镜下特征

Fig.2 The hand specimens and micrographs of ores and associated wall rocks of the Shanzhuang iron deposit
图 a 为矿区主要含矿围岩,1.黑云斜长变粒岩,2.黑云钾长变粒岩,3.黑云二长变粒岩;图 b 为矿区主要矿石,1.含石榴石角闪铁石英岩,2.角闪磁铁石英岩,条带状构造;图 c 为黑云变粒岩正交镜下特征,主要由黑云母、石英、钾长石组成;图 d 为角闪磁铁石英岩反光镜下特征,磁铁矿大致定向分布,变质重结晶作用明显,后期黄铁矿交代早期磁铁矿

特征见图 2).工作区岩浆岩不发育,仅在新太古代泰山岩群变质岩系中穿插有花岗伟晶质岩脉,偶见薄层闪长玢岩、粗玄岩、安山岩等。

根据区域地质特征和钻孔编录情况,笔者结合磁场分布特征、音频大地电磁测深等物探成果,在矿区推断了 6 条有一定规模的断层,编号 $F_1 \sim F_6$,均为张性断层。其中, F_1 、 F_2 和 F_3 断层走向均为 NW 向,它们的形成时代早于另外 3 条走向为 NE 的断层(F_4 、 F_5 和 F_6)。 F_1 、 F_2 和 F_3 被后期 F_4 错断(图 3)。

本文暂将本矿区分为北区柳林屯(CY-3)矿段和南区前翟坊(CY-2)矿段,共圈定大小矿体 20 余个,矿体走向为 $150^\circ \sim 175^\circ$,倾向 SW,倾角为 $56^\circ \sim 75^\circ$,TFe 平均品位为 28%,mFe 平均品位为 22%,预计铁矿石资源量可达 1 亿吨,是山东省在黄河以北隐伏覆盖区首次发现的大一中型铁矿产地。

矿石金属矿物主要为磁铁矿,少量赤铁矿、黄铁矿,偶见黄铜矿、铜蓝。非金属矿物以石英、普通角闪石为主,其次为黑云母、石榴子石、绿泥石、斜长石、方解石、绢云母,副矿物有磷灰石。矿石结构以半自形粒状变晶结构为主。矿石构造主要为条带状构造,其次为块状构造、浸染状构造。按组成矿石的主要铁矿物划分,矿石类型为磁铁矿石和假象赤铁矿石两种,以前者为主。矿石的化学成分主要为 SiO_2 、 FeO 、

Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 S 、 P_2O_5 ,其次为 Cu 、 Pb 、 Sn 、 Mn 、 Ti 、 Cr 、 Ni 、 Mo 、 V 、 Ag 、 Zn 、 Co 等。

2 综合物探工作

2.1 岩石物性和区域航磁异常特征

由表 1 可知,泰山岩群变质岩系总体磁性较高,该岩系中赋存的铁矿层具有更高的磁性,岩浆岩类岩石磁性总体偏低,沉积岩几乎无磁性。因此,采用磁法测量可有效圈定泰山岩群的分布范围,而且,铁矿层因其极高的磁性也可与泰山岩群变质地层加以区分。

区域航磁主要有长清磁异常、东阿牛角店磁异常和平阴洪范池磁异常。本区位于洪范池异常西北侧,航磁背景值一般为 $50 \sim 250$ nT,整体展示了沿北西走向分布的航磁异常带。

本区与洪范池矿区、汶上—东平矿区的磁场特征类似,但强度略低,这可能与该区为隐伏覆盖区或寒武纪地层较厚有关。推测本区铁矿为汶上—东平铁矿带的北延部分,其走向应与汶上—东平铁矿带大体一致。泰山岩群中磁铁矿体中岩石磁性较高,可引起较强的局部磁异常。因此,对于该区铁矿勘查而言,利用高精度磁法测量寻找规模较大的磁铁矿床具有较好的地球物理前提。

2.2 地面高精度磁测及异常特征

在对区域岩石物性和航磁异常有了深入研究后,项目组针对本区开展 1:10 000 地面高精度磁测和 1:2 000 磁测剖面工作,以期全面了解和掌握测区地磁场的分布特征和分布规律,为在本区开展铁矿普查和大比例尺地质填图提供许多新的物探信息(卢焱等,2008)。地面高精度磁测化极 ΔT 等值线平面图(图 4a)显示该区大部分磁场变化比较简单,磁场比较平稳,异常明显,形态规则, ΔT 值一般在 $-90 \sim 300$ nT 变化。共圈定 4 处异常,分别为辛庄异常(CY-1)、前翟坊异常(CY-2)、柳林屯异常(CY-3)和姜庄异常(CY-4)。本文重点讨论 CY-2 和 CY-3 两个异常及它们之前的数个次级异常。

磁测工作采用重庆奔腾数控技术研究所生产的 WCZ-1 质子磁力仪,测量参数为地磁场总场值(T)。该仪器主要参数为:测量范围为 $20 000 \sim 100 000$ nT;测量精度为 ± 1.0 nT;分辨率为 0.1 nT;允许梯度 $\leq 5 000$ nT/m;工作温度为 $-10 \sim 50$ ℃。磁测面积工作比例尺为 1:10 000,测网网度为 $100 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,方位角为 0° ,磁测剖面工作比例尺为

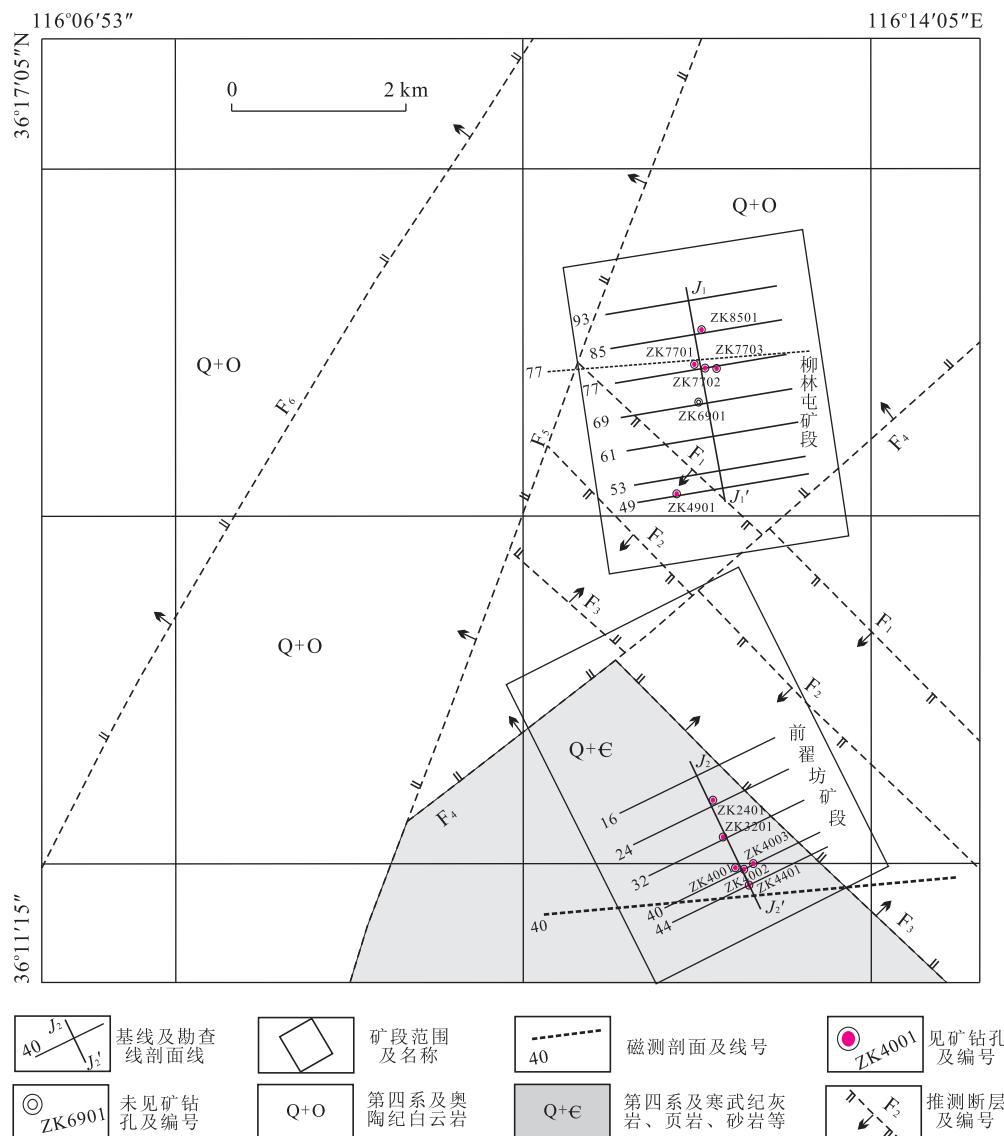


图 3 单庄铁矿基岩地质(附工程部署)图

Fig.3 The bedrock geological sketch of the Shanzhuang iron deposite (with project deployment)

表 1 区域岩(矿)石磁性参数统计

Table 1 Statistics of the regional (ore) rock magnetic parameters

类别	标本名称	块数	$\kappa (10^{-6} 4\pi SI)$		$J_r (10^{-3} \cdot A/m)$	
			变化范围	平均值	变化范围	平均值
铁矿石	条带状角闪石英铁岩	56	1 210~215 000	73 200	542~500 000	22 900
	条带状磁铁角闪石英岩	17	3 100~107 200	25 200	262~14 900	3 020
变质岩	黑云变粒岩	292	0~1 797	127	0~668	97
	含石榴石黑云变粒岩	7	951~46 000	16 700	271~7 800	2 020
岩浆岩	斜长角闪片麻岩	22	235~4 600	1 700	140~6 400	4 000
	辉绿岩	45	1 150~6 760	3 690	261~3 938	1 019
沉积岩	二长花岗岩	85	0~1 650	726	0~205	110
	花岗岩	67		506		214
沉积岩	石灰岩	95	微	微	微	微

注: κ 为磁化率; J_r 为剩余磁化强度; “微”代表数值在检测限以下。

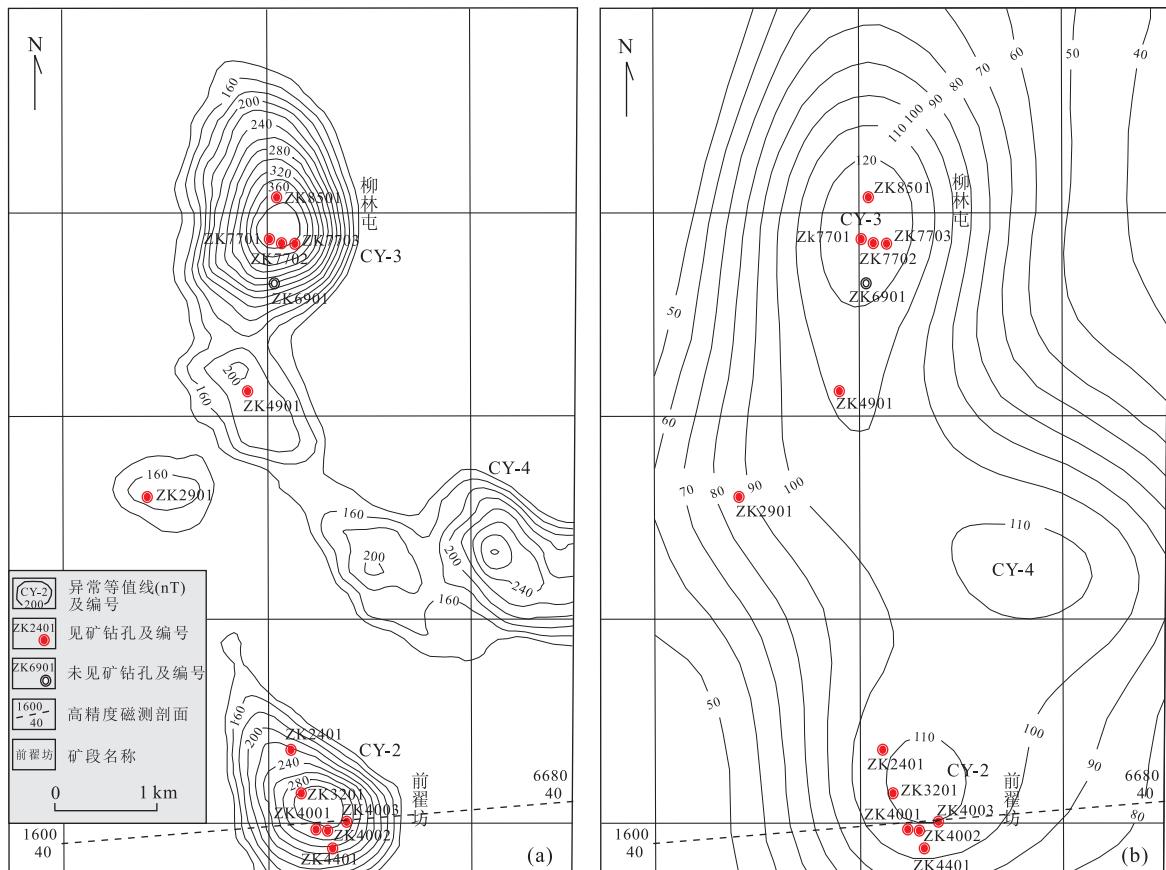


图4 单庄地区高精度磁测 ΔT 化极等值线平面图

Fig.4 The high-precision magnetic ΔT anomaly contour surfaces of the Shanzhuang area

a.原等值线平面图;b.上延1000 m等值线平面图;图中高精度磁测剖面1600和6680代表点号,40代表线号

1:2000,点距为10 m。

对 ΔT 进行化极上延处理后,随着上延高度的增加,中高频磁异常逐步消失,上延1000 m(图4b)后异常基本连成一片,区域磁特征更加清晰,说明该磁性体向下有一定的延伸,即反映基底岩性的特征。由物性资料可知,如无大规模的岩浆岩体,这些磁异常应为泰山岩群变质岩系所致。因此可以推断,区内大规模的宽大异常大致反映了泰山岩群地层的分布特征,而在异常中形成的较强局部异常,则为BIF所引起的,这也是本次工作的重点。

CY-2前翟坊异常位于测区的东南部,前翟坊村以南200 m处,以 ΔT 值240 nT圈定等值线往南未封闭。异常呈椭圆状,长约为1500 m,宽约为1000 m,走向为142°, ΔT 极值为340 nT,磁场值由极值中心向外梯度递减。大致以260 nT等值线圈定异常,与 ΔT 原平面相比,其异常主体向北发生偏移约为400 m, ΔT 化极上延150 m、500 m甚至1000 m后异常仍然非常明显,说明该磁性体向下具有一定延伸。此外,在 ΔT 化极上延150 m垂向二阶导

数等值线平面图上也有明显的高值异常,进一步指示了该异常为矿致异常的可能性。

CY-3柳林屯异常位于测区东北部,柳林屯以东100 m处,以 ΔT 值200 nT圈定等值线呈椭圆形,异常长约为2000 m,宽约为1500 m,走向为90°, ΔT 最高值为340 nT。对异常进行化极处理后,大致以220 nT的等值线圈闭,与 ΔT 原平面异常相比,异常主体向北发生偏移400 m左右,幅值有所增强。 ΔT 化极上延500 m后异常仍然非常明显,说明该磁性体向下具一定延伸,在 ΔT 化极上延150 m垂向二阶导数等值线平面图上以 $\Delta T''$ 零等值线圈闭的异常也有明显的高值反映,进一步显示了该异常为矿致异常的可能性。

由于CY-2和CY-3异常等值线均为东密西稀(图4),推测矿头位于异常中心偏东方向,矿体倾向近于西。

为了证实磁测扫面的准确性,方便下一步地质钻探验证,笔者又做了数条猜测剖面来大致确定磁性体的具体分布范围。下面重点介绍两条剖面,分别

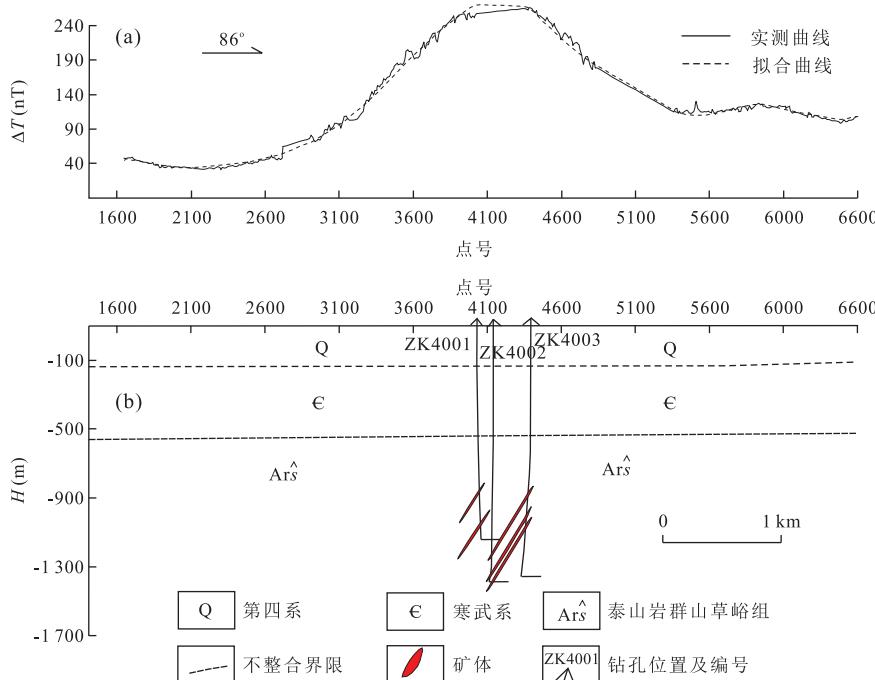


图 5 CY-2 异常 40 线精测剖面(a)和反演综合剖面(b)

Fig.5 The high-precision profile (a) and the high-precision profile inversion (b) of the Line 40 from the CY-2 anomaly

为 CY-2 异常 40 线剖面和 CY-3 异常 77 线剖面。

CY-2 异常 40 线精测剖面反演综合剖面图(图 5), 剖面方位角为 86°, 异常剖面长约为 2 km, 由图中可以看出, ΔT 曲线 3100~4500 号点间有明显的峰值异常区, 对应异常峰值区, 依据模型反演计算其下方推断出 4 个强磁性地质体分布, 它们近平行排列, 倾向近于西。

类似于 CY-2 异常, CY-3 异常 77 线精测剖面方位角为 86°, 异常剖面长约为 1.1 km, ΔT 曲线 3100~4500 号点间有明显的峰值异常区, 对应异常峰值区, 依据模型反演计算其下方推断出 3 个强磁性地质体分布, 它们近平行排列, 倾向近于西。

3 地质钻探验证和井中三分量磁测

3.1 地质钻探验证

结合本区航磁异常特征, 笔者发现高精度磁测异常与其有很好的一致性。另外, 结合区域地质条件, 本区应处于汶上—东平铁矿带的北延部位, 由于 BIF 型铁矿床属沉积变质型铁矿床, 整体产状相对较为稳定, 本区矿体产状可能与同矿带内其他矿床矿体产状近于一致, 类比本区东南方向约 15 km 的洪范池铁矿, 推测本区铁矿矿体总体走向为 150°~175°, 倾向 SW, 产状较陡。

鉴于以上分析, 笔者首先在 CY-2 和 CY-3 异常分别布设了 ZK4001 和 ZK7701 两个钻孔。钻探结果显示: ZK4001 在 851~1 080 m 处分别见有 4 层磁铁石英岩矿体, 最厚层可达 23 m。ZK7701 在 900~1 157 m 处分别见有 4 层磁铁石英岩矿体, 最厚层可达 21 m。

笔者又按照预设的勘查线布设了数个钻孔, 多数均达到了预期地质勘查目的。根据勘查线剖面图, 基本确定了矿体倾向 SW, 倾角为 56°~75°。两个矿段之间的次级异常经钻探验证也均为矿致异常 (ZK4901 和 ZK2901 两个钻孔均见有工业矿体)。

3.2 井中三分量磁测

井中三分量磁测是地球物理测井的一种, 它主要用来勘查磁铁矿床或含强磁性矿物的多金属矿床。特别在深部磁性矿床的勘查中, 由于探管距离磁性体较近, 测量的磁异常曲线自然明显 (陈天振等, 2008)。根据井中三分量磁测数据, 绘制出 ΔT 、 ΔH 、 ΔZ 等曲线图可有效寻找钻孔底部的盲矿体。笔者选取取得较好测井效果的 ZK4002 和 ZK4003 钻孔测井成果予以介绍:

测井工作采用了中装集团重庆地质仪器厂生产的 JGS-1B 智能综合数字测井系统及 JCX-3 型井中磁力仪探管。

测井主机技术指标: 数字传输信号频率为

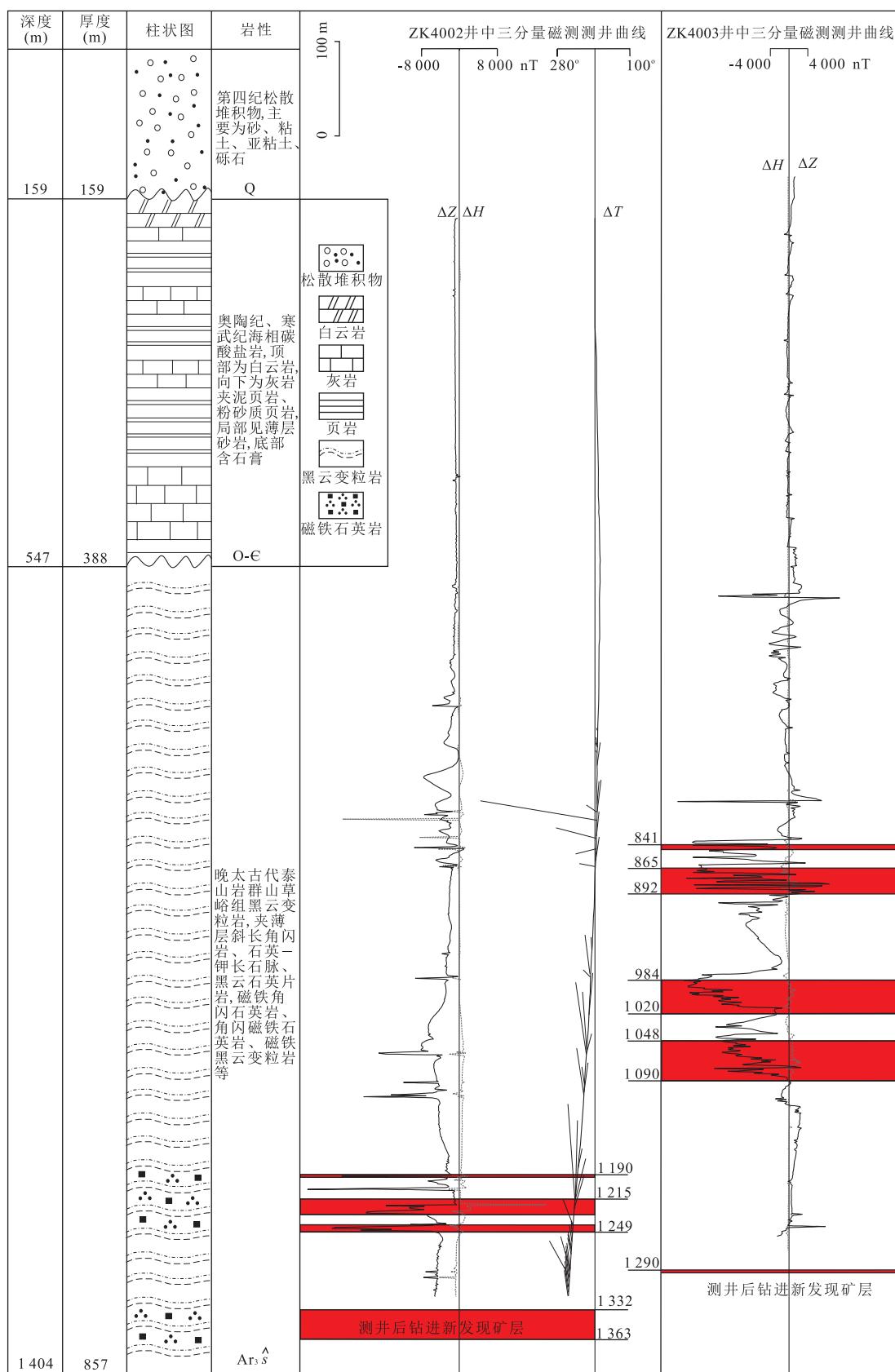


图 6 ZK4002、ZK4003 井中三分量磁测测井曲线

Fig.6 Three components of geomagnetic profiles of both borehole ZK4002 and borehole ZK4003

 $\triangle Z$ 代表磁异常垂直分量; $\triangle H$ 代表磁异常水平分量模量; $\triangle T$ 代表磁异常矢量

9 600 bif/s; 井下供电电源为 DC 60~120 V/0.5 A, 电压调整率为 1%, 纹波小于 0.5%; 深度范围 ≤ 2100 m; 工作温度为 $-10\sim50$ °C; 工作电源为 AC 220 ± 22 V, 频率为 50 Hz; 测井速度为 0~30 m/min(可调).

JCX-3 型三分量磁力仪探管主要技术指标: 测量范围为 $-99\,999\sim99\,999$ nT; X、Y 磁敏感元件转向差 ≤ 400 nT; Z 磁敏感元件转向差 ≤ 300 nT; 倾角测量范围为 $0^\circ\sim45^\circ$, 误差小于 0.2° ; 方位角测量范围为 $0^\circ\sim360^\circ$, 误差小于 2° (倾角 $\geq 3^\circ$); 探管耐压 > 150 kg/cm²; 仪器工作电源为 DC 12 V/200 mA; 工作环境为 $0\sim70$ °C, 湿度为 90%(40 °C).

ZK4002 位于 ZK4001 偏东约 100 m 处, 施工目的是为控制矿体产状. 在 1 215~1 250 m 见有厚约 20 m 磁铁矿层(含夹石), 在钻进至 1 319 m 处进行了井中三分量磁测, 测井曲线如图 6, 测井结果显示在 1 190~1 249 m 处为磁铁矿层, 这与实际见矿情况一致. 但是在 1 259 m 至孔底, $\triangle Z$ 呈负开口, 开口幅度随深度加深逐渐增大, 对应的 $\triangle T$ 矢量, 呈平行状态指向钻孔的北侧上方, 据此推断孔底在仪器范围内可能存在隐伏磁铁矿体, 建议钻进验证, 结果继续钻进后在 1 332~1 363 m 处见有厚约 21 m 的磁铁矿层(含夹石), 说明井中三分量磁测的准确性和必要性, 否则笔者很可能错过了该层主矿体. 在施工过程中笔者发现, 在钻孔上部的预计见矿位置并未见矿, 但是测井曲线和结果上显示 726~799 m 和 900~1 176 m 井段检测到钻孔旁侧异常, 但是结合岩心并未发现磁铁矿层, 推测 ZK4001 钻孔中发现的两层矿体向上很可能发生了尖灭, 这些都指示了井中三分量磁测对于矿体的圈定也会起到至关重要的作用.

ZK4003 钻孔位于 ZK4002 钻孔偏东约 210 m, 在 834~890 m、974~1 013 m 和 1 020~1 086 m 这 3 处位置检测到较明显磁异常, $\triangle Z$ 、 $\triangle H$ 曲线为明显异常形态, 呈锯齿状剧烈波动, 表明矿层磁性不均匀, 有弱磁性的夹层存在. 对比钻孔编录资料, 这 3 处井段均对应磁铁石英岩矿层, 中间夹层为黑云变粒岩. 自 1 231 m 位置以下, 直至 1 268 m 井段, $\triangle Z$ 曲线由正值逐渐过渡到负值, 且有随深度增加, 逐渐呈负开口的趋势, 而 $\triangle H$ 曲线呈明显负开口趋势, 因此笔者推断钻孔深部可能仍有磁性体存在(图 6). 经钻探验证, 在 1 290~1 293 m 井段发现一段磁铁石英岩矿层, 与测井推断吻合, 再次印证了井中三分量磁测对于矿体的圈定发挥着重要作用.

4 结论

(1) 以区域航磁等地球物理资料为基础, 通过在覆盖区实施高精度磁法测量和钻探等地质工作方法, 山东省黄河以北实现了隐伏铁矿找矿新突破.

(2) 在主要铁矿带的延伸方向上, 要充分研究铁矿带内的各矿区矿体的特征, 尽量做到对矿体产状的准确预判, 有利于实现找矿新突破.

(3) 在钻探过程中或终孔结束前, 要重视井中三分量磁测这一物探方法, 它对于井下盲矿体的圈定和井中旁侧异常的指示将会起到至关重要的作用.

致谢: 该论文是山东省东阿县单庄地区铁矿普查项目成果的一部分, 是全体参与项目的科研人员的工作结晶. 物探方面得到了山东省物化探勘查院李斌工程师、张清友工程师、孙波工程师的支持和帮助. 另外, 非常感谢两位匿名审稿人提出的中肯意见.

References

- Chen, T.Z., Li, W.H., Xu, S.Q., et al., 2008. The Method of Borehole Three-Component Magnetic Survey and Its Effective Originally Exploration. *Progress in Geophysics*, 23(3): 892—897 (in Chinese with English abstract).
- Guan, Z. N., 1997. Researches and Progresses on Magnetic Prospecting in China. *Acta Geophysica Sinica*, 40(Suppl.1): 299—307 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Meng, X.H., Fan, Z.G., et al., 2007. Application of Fine Gravity and Magnetic Data Processing and Interpretation in the Prospecting of Crisis Mines. *Earth Science*, 32(4): 559—563 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S., Hu, X.Y., Liu, T.Y., 2014. Characteristics and Applications of Variogram for Gravity and Magnetic Fields. *Earth Science*, 39(11): 1725—1734 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T.Y., Wu, Z.C., Zhan, Y.L., et al., 2007. Wavelet Multi-Scale Decomposition of Magnetic Anomaly and Its Application in Searching for Deep Buried Minerals in Crisis Mines: A Case Study from Daye Iron Mines. *Earth Science*, 32(1): 135—140 (in Chinese with English abstract).
- Lou, D.B., Song, G.X., Li, N., et al., 2008. The Application of Magnetic Method in National Mineral Prediction. *Progress in Geophysics*, 23(1): 249—256 (in Chinese with English abstract).
- Lu, Y., Li, J., Bai, X.S., et al., 2008. Application of Magnetic Survey on Hidden Iron Deposit Prospecting—Case

- Study on Luaping II Iron Deposit in Hebei Province, China.*Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(4): 698—702 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Q.H., 2012. A Number of Issues That should be Noted in Deep Anshan Iron Mine Exploration. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1331—1334 (in Chinese).
- Shen, Q.H., Song, H.X., Zhao, Z.R., 2009. Characteristics of Rare Earth Elements and Trace Elements in Hanwang Neo-Archean Banded Iron Formation, Shandong Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 693—699 (in Chinese with English abstract).
- Sun, W.K., Wang, J.L., Qi, W.X., et al., 1997. A Review and Prospects for the Geophysical Exploration on Metallic and Nonmetallic Deposits in China. *Acta Geophysica Sinica*, 40(Suppl.1): 351—361 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y.S., Dong, C.Y., Xie, H.Q., et al., 2012. Formation Ages of Early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1447—1478 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X.Q., Li, H.M., Li, L.X., et al., 2014. Geochemical Characteristics of Banded Iron Formations in Liaoning-Eastern Hebei Area: I. Characteristics of Major Elements. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1218—1238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L.C., Zhai, M.G., Wan, Y.S., et al., 2012. Study of the Precambrian BIF-Iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431—3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q.J., Yang, J., 2010. The Application of Integrated Electric Methods to the Exploration of Deep Concealed Ore Bodies. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 34(1): 40—43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Zhang, S.X., Liang, Q., et al., 2015. Application of Boundary Identifying Technologies Using Gravity and Magnetic Maps in Three-Dimensional Geological Mapping of Western Junggar Area. *Earth Science*, 40(3): 431—440 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.Q., Zhang, C.J., Wang, S.J., et al., 2014. Views on Classification and Contrast of Tectonic Units in Strata in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 30(3): 1—23 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈天振,李卫花,徐遂勤,等,2008.井中三分量磁测方法与初探效果.地球物理学进展,23(3):892—897.
- 管志宁,1997.我国磁法勘探的研究与进展.地球物理学报,40(S1):299—307.
- 李淑玲,孟小红,范正国,等,2007.危机矿山重磁资料精细处理与解释:以湖北省大冶铁矿为例.地球科学,32(4): 559—563.
- 刘双,胡祥云,刘天佑,2014.重磁场的变差函数特征及应用.地球科学,39(11):1725—1734.
- 刘天佑,吴招才,詹应林,等,2007.磁异常小波多尺度分解及危机矿山的深部找矿:以大冶铁矿为例.地球科学,32(1):135—140.
- 娄德波,宋国玺,李楠,等,2008.磁法在我国矿产预测中的应用.地球物理学进展,23(1):249—256.
- 卢焱,李健,白雪山,等,2008.地面磁法在隐伏铁矿勘查中的应用——以河北滦平II号铁矿为例.吉林大学学报(地球科学版),38(4):698—702.
- 沈其韩,2012.鞍山式铁矿深部找矿整装勘查中应注意的若干问题.地质学报,86(9):1331—1334.
- 沈其韩,宋会侠,赵子然,2009.山东韩旺新太古代条带状铁矿的稀土和微量元素特征.地球学报,30(6):693—699.
- 孙文珂,王继伦,齐文秀,等,1997.我国金属与非金属矿物探的回顾与展望.地球物理学报,40(S1):351—361.
- 万渝生,董春艳,颉顽强,等,2012.华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP锆石U-Pb定年.地质学报,86(9):1447—1478.
- 杨秀清,李厚民,李立兴,等,2014.辽冀地区条带状铁建造地球化学特征: I. 主量元素特征.岩石学报,30(5): 1218—1238.
- 张连昌,翟明国,万渝生,等,2012.华北克拉通前寒武纪BIF铁矿研究:进展与问题.岩石学报,28(11):3431—3445.
- 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.物探与化探,34(1):40—43.
- 张壹,张双喜,梁青,等,2015.重磁边界识别方法在西准噶尔地区三维地质填图中的应用.地球科学,40(3): 431—440.
- 张增奇,张成基,王世进,等,2014.山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见.山东国土资源,30(3):1—23.