

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

刘天佑¹, 吴招才¹, 詹应林², 周 逵²

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国冶金总局中南地质勘查院, 湖北武汉 430000

摘要: 大冶铁矿是多年开采老矿山, 浅部的铁矿已开采殆尽, 为了进一步挖潜, 利用小波多尺度分析方法, 将磁异常分解到不同尺度空间, 结合谱分析方法解释深部盲矿体。理论模型和 19—1 勘探线的实际资料的小波分解结果表明, 该方法比常规的空间延拓、高次导数、匹配滤波等方法要好。通过处理与解释指出了西段(尖林山、龙洞、铁门坎)五阶小波细节已无剩余异常存在, 推测在 1 000 m 以下已没有大型的铁矿体存在。但在东段(尖山、犁头山)五阶小波细节还有剩余异常, 推测 1 000 m 深部可能还有铁矿体。根据小波多尺度分析方法结合人机交互反演推断 15~12 线有铁矿体, 2005 年 9 月布钻验证, 在 15~1 线打到 30 多米厚磁铁矿体。

关键词: 危机矿山; 磁异常; 小波多尺度分解; 谱分析; 大冶铁矿。

中图分类号: P631.2

文章编号: 1000-2383(2007)01-0135-06

收稿日期: 2006-06-22

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

LIU Tian-you¹, WU Zhao-cai¹, ZHAN Ying-lin², ZHOU Kui²

1. Institute of Geophysics and Geomatic, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Central South Geological Survey of China Exploration & Engineering Bureau, Wuhan 430000, China

Abstract: The shallow iron ores of Daye mines are exhausted after years of exploration and mining. In order to search for deep-buried ores, the wavelet multi-scale analysis method was employed to decompose the magnetic anomaly into different scales and further explain the deep-buried unknown ore body through the combination of spectrum analysis. Theoretical modeling indicates that this method is superior to ordinary approaches such as analytical continuation, higher order derivatives, matched filter and so on. Magnetic data processing and interpretation of the Daye iron mines show that there is no large-scale iron ore below the depth of 1 000 m at its western part (Jianlinshan, Longdong and Tiemenkan), for the residual magnetic anomaly is not present in its five order wavelet approximation map. On the contrary, the residual anomaly still exists in the five order wavelet approximation map of the eastern mines (Jianshan, Litoushan), indicating the possible existence of iron ores at the depth of 1 000 m, which needs to be further researched.

Key words: crisis mines; magnetic anomaly; wavelet multi-scale decomposition; spectrum analysis; Daye iron mines.

0 引言

大冶铁矿位于黄石市西北 25 km 处, 是武汉

钢铁公司重要的铁矿石生产基地, 矿床类型属接触交代型(矽卡岩型)铁铜矿床。20 世纪 50 年代以来, 在大冶铁矿及外围开展了大量的地质、地球物理工

作,完成了 1:10 万、1:5 万航磁测量,1:1 万地面磁测扫面和井中三分量磁测(姚培慧,1993),2004 年又完成了 1:2 000 地面高精度磁测^①。

老矿山多年开采,浅部的铁矿已开采殆尽,进一步挖潜、勘查接替资源任务十分紧迫。大冶铁矿区深部及外围可能还有未发现的铁矿体,但是这些矿体埋深大、规模小、产生的磁异常弱,识别与提取弱异常必须有相应的新方法技术。以往数据处理中通常采用空间延拓、高次导数、匹配滤波或统计模型等方法来分离和增强某一类异常(Spector and Grant, 1970),但是这些方法无法定性或半定量地把实测的磁异常分解为几个表示不同深度的地质体产生的磁异常,因此无法较准确地推断大冶铁矿 800 m 深部是否还有未发现的铁矿体。小波多尺度分解能将重磁异常精细地分解到多个不同的尺度上来反映不同尺度和深度的异常,常被用于区域重力场的分解和分析,并得到了较好的效果(侯遵泽和杨文采,1997;高德章等,2000)。为此,我们采用小波多尺度分解方法,把实测磁异常分解为几个不同阶的细节,并用谱分析(Bhattacharyya and Lei, 1975)方法计算它们所代表的场源深度,以此来分析 800 m 深部是否还有未发现的铁矿体。为了证明上述方法的可靠性,我们用球体模型做了检验。

1 方法原理

1.1 小波多尺度分解

设函数 $f(t) \in L^2(R)$, 定义其小波变换为:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt,$$

其中,函数系 $\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$, $a \in R$, $a \neq 0; b \in R$, 称为小波函数(wavelet function)或简称为小波(wavelet),

$$\psi(t) \text{ 满足条件 } \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0,$$

$$\text{令 } C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty,$$

其中, $\hat{\psi}(\omega)$ 是 $\psi(t)$ 的傅里叶变换,得相应的小波逆变换公式为:

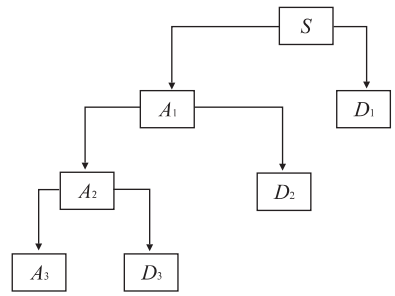


图 1 三层多尺度分析结构

Fig. 1 Multi-scale analysis structure

$$f(t) = C_\psi^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_f(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da}{a^2} db.$$

取 $a = a_0^j, b = ka_0^j b_0, a_0 > 1, b_0 > 0$, 则有小波变换的离散形式:

$$W_f(j, k) = a_2^{-\frac{j}{2}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) \hat{\psi}(a_0^{-j} n - kb_0), \quad j, k, n \in Z.$$

此时 $\psi_{j,k}(n) = a_0^{-\frac{j}{2}} \psi(a_0^{-j} n - kb_0), j, k, n \in Z$.

特别地,取 $a_0 = 2, b_0 = 1$,

$$\psi_{j,k}(n) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j} n - k), \quad j, k, n \in Z,$$

$$W_f(j, k) = 2^{-\frac{j}{2}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} f(n) \hat{\psi}(2^{-j} n - k), \quad j, k, n \in Z.$$

可以证明 $\{\psi_{j,k}(n)\}$ 构成 $L^2(R)$ 空间一组标准正交基,于是,相应的小波逆变换为:

$$f(n) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} W_f(j, k) \psi_{j,k}(n), \quad j, k, n \in Z.$$

多尺度分析又称多分辨分析,对于离散序列信号 $f(t) \in L^2(R)$, 其小波变换采用 Mallat 快速算法,信号经尺度 $j=1, 2, \dots, J$ 层分解后,得到 $L^2(R)$ 中各正交闭子空间 $(W_1, W_2, \dots, W_J, V_J)$, 若 $A_j \in V_j$ 代表尺度为 j 的逼近部分, $D_j \in W_j$ 代表细节部分, 则信号可以表示为 $f(t) = A_j + \sum_{j=1}^j D_j$, 据此函数可以根据尺度 $j=J$ 时的逼近部分和 $j=1, 2, \dots, J$ 的细节部分进行重构,图 1 为三层多尺度分析结构图。

1.2 谱分析方法确定场源深度

我们以所设计的球体模型为例,说明谱分析方法确定场源深度的原理。利用重磁位场的泊松公式,容易得出球体磁场 ΔZ 的频谱表达式为:

$$S_Z(u, v) = 2\pi M_s [i(u\alpha + v\beta) + \gamma\sqrt{u^2 + v^2}] \cdot e^{-\beta}.$$

其中, $M_s = \frac{4}{3} \pi r^3 J$, r 为球体半径, J 为磁化强度,

^①中国冶勘总局中南地质勘察院,2004. 湖北省黄石市大冶铁矿高精度磁测阶段工作报告。

$S = \sqrt{u^2 + v^2}$, u 和 v 分别为 x 和 y 方向的圆波数, α 、 β 、 γ 为磁场 T 方向的余弦, h 为球体中心埋深。

由(1)式可得球体磁场 ΔZ 的振幅谱为:

$$A(u, v) = 2\pi M_s [S^2 - (ul + vm)^2]^{1/2} \cdot e^{-sh} \quad (2)$$

由(2)式可以看出,球体振幅谱随 u 和 v 的变化是单峰值曲线,振幅随中心埋深 h 呈负指数衰减,若对(2)式两边取对数:

$$\ln A(u, v) = \frac{1}{2} \ln \pi M_s [S^2 - (ul + vm)^2]^{1/2} - sh \quad (3)$$

可见,利用(3)式振幅谱斜率可以确定场源深度 h 。利用对数振幅谱的斜率来确定场源深度 Bhattacharyya and Lei(1975), Spector and Grant(1970)的文中已有论述,在实际用对数功率谱来计算场源深度时,还必须把(3)式波数 u 和 v 的两个自变量转为单个自变量的径向波数。

2 模型检验

把图 1 多尺度分析方法应用于磁法勘探资料处理,野外观测值 ΔZ 经一阶小波分解,得到局部场 $\Delta Z_{局1}$ 和区域场 $\Delta Z_{区1}$,把 $\Delta Z_{区1}$ 作二阶小波分解得到 $\Delta Z_{局2}$ 和 $\Delta Z_{区2}$,再把 $\Delta Z_{区2}$ 作三阶小波分解可得 $\Delta Z_{局3}$ 和 $\Delta Z_{区3}$,……,如此分解下去,我们以三阶为例表示为下式:

$$\Delta Z = \Delta Z_{三阶逼近} + \Delta Z_{三阶细节} + \Delta Z_{二阶细节} + \Delta Z_{一阶细节}$$

为了阐述各阶小波细节的地质意义和小波多尺度分解可用于提取深部弱信号,我们设计了理论模型,4 个球体磁化强度均为 $100\,000 \times 10^{-3}$ A/m,为简单起见,磁化倾角 I 取 90° ,其他参数如表 1 所示,4 个球体磁场的极大值列于表 2。

图 2 为球体模型的正演磁异常图和一~五阶细节和五阶逼近图,由图可以看出:

(1)一阶细节,由功率谱分析得出它反映场源似深度为 16 m,埋深为 50 m 的球体在一阶细节图上极大值为 1 607 nT(图 2b),可以看出它主要分离出埋深为 50 m 球体的磁场。

(2)二阶细节,反映场源似深度为 71 m,埋深为 50 m 的球体在二阶细节图上极大值为 340 nT(图 2c),可以看出,一、二阶细节把埋深为 50 m 的球体的磁场已几乎全部分离了。但埋深为 200 m、500 m、

表 1 球体模型参数

Table 1 Sphere model parameters

球体	1	2	3	4
水平位置(x,y)	(3 000, 2 750)	(1 000, 2 500)	(2 750, 1 250)	(950, 1 250)
中心埋深(m)	50	200	500	800
半径(m)	15	30	50	120
正演 ΔZ 极大值(nT)	2 004	277	78	282

表 2 球体模型磁场极大值(nT)

Table 2 Maximal value of sphere model magnetic field

球体	1	2	3	4
正演场值	2 004	277	78	282
一阶细节	1 607	68	2	2
二阶细节	340	113	17	30
三阶细节	57	68	26	68
四阶细节	4	23	18	88
五阶细节	-6	-2	-5	54

800 m 球体的磁场也有部分反映在二阶细节中,它们的极大值为 113 nT、17 nT、30 nT。

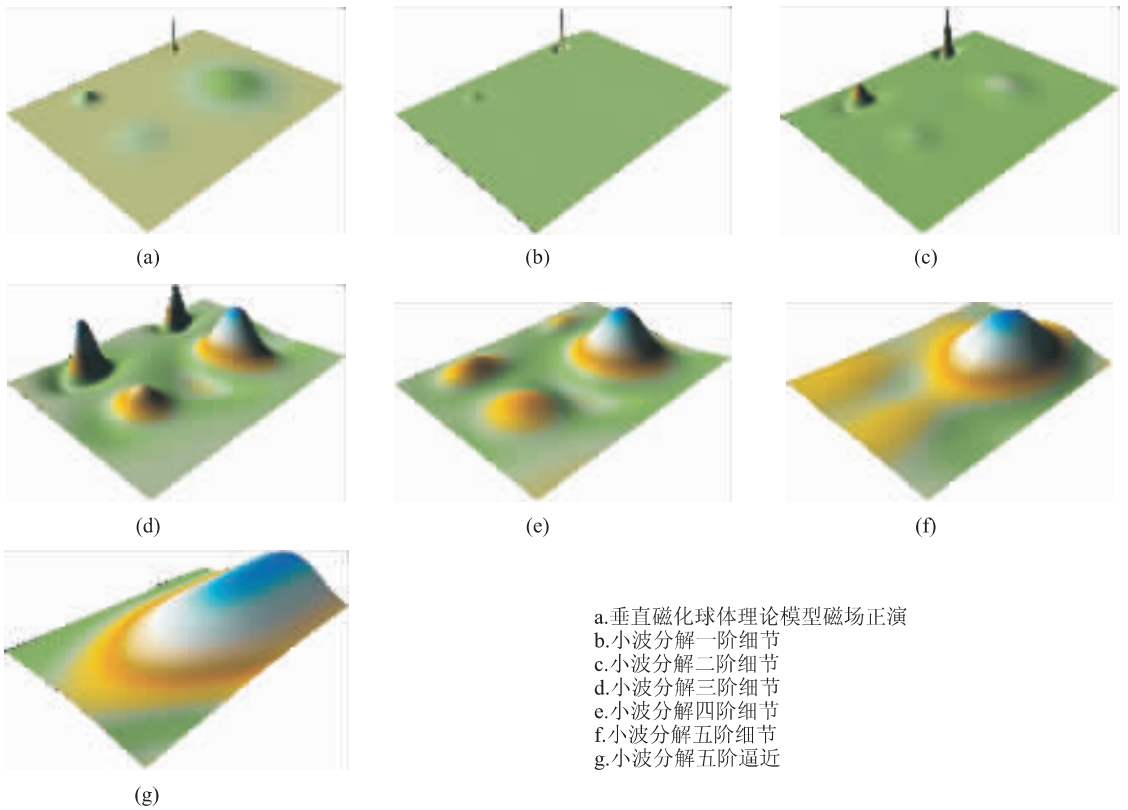
(3)三阶细节,反映场源似深度为 194 m,埋深 200 m 球体异常十分显著,最大值为 68 nT(图 2d),它主要分离出埋深为 200 m 的球体的磁场,但埋深为 500 m、800 m 球体的磁场也有部分反映在三阶细节中。

(4)四阶细节,反映场源似深度为 456 m,此时 50 m、200 m 球体影响已很小,极大值分别只有 4 nT、23 nT,而埋深 500 m、800 m 球体异常较强(图 2e)。

(5)五阶细节,反映场源似深度为 780 m(图 2f),可以看出埋深为 50 m、200 m、500 m 的 3 个球体异常已完全消失,该图主要反映埋深 800 m,而五阶逼近反映场源似深度为 1 061 m,已没有 4 个球体局部异常的特征(图 2g)。

由以上分析我们得出:小波多尺度分解可以把不同深度磁性体产生的磁场在一定程度上分离,如上述理论模型,五阶细节提取了 800 m 深的磁性体产生的异常,而 50 m、200 m、500 m 深磁性体的影响已经可以排除。因此,我们可以用这种方法去识别与提取深部是否还有未发现的磁性体。

为了进一步说明小波分解的各阶细节与不同深度磁性体的对应关系,我们又对有已知磁性体分布的 19-1 勘探线磁异常作了进一步分析。图 3a 中的红色实线是小波分解的三阶细节,其场源似深度为 235 m,红色虚线是埋深为 200 m 左右的 1 号磁性体(开采铁矿,图 3b 所示)产生的磁异常,磁异常的正



a.垂直磁化球体理论模型磁场正演
 b.小波分解一阶细节
 c.小波分解二阶细节
 d.小波分解三阶细节
 e.小波分解四阶细节
 f.小波分解五阶细节
 g.小波分解五阶逼近

图2 垂直磁化组合球体磁场及小波多尺度分解

Fig.2 Field of vertically magnetized spheres and wavelet multi-scale decomposition

演计算是采用二度半任意多边形截面水平棱柱体模型. 两者异常的幅值和形态大致相似. 类似的, 图 3a 中的蓝色实线是四阶小波细节, 其场源似深度为 488 m, 蓝色虚线是埋深为 500 m 左右的 2—6 号磁性体(磁铁矿和矿化砂卡岩等, 图 3b 所示)产生的磁异常, 两者异常的幅值和形态也大致相似. 由此可见, 把磁异常作小波多尺度分解, 它的各阶细节能够反映某一深度范围的磁性体. 19—1 勘探线实际资料和上述理论模型的对比都说明了这一结论.

3 在大冶铁矿的应用

由于 2004 年完成的高精度磁测 ΔT 资料人文干扰十分严重, 而 20 世纪 60 年代完成的 ΔZ 资料不仅人文干扰小, 而且很多铁矿尚未开采, 信息十分丰富, 所以我们采用 ΔZ 资料.

图 4a~4d 是大冶铁矿 ΔZ 磁异常平面等值线图及一、五阶小波分解的细节及五阶逼近, 一阶细节功率谱分析场源似深度 26 m(图 4b), 局部异常反映露天矿及浅表磁性不均匀以及人文活动干扰(如铁

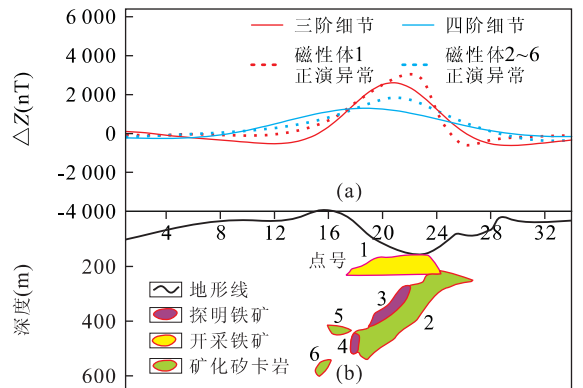


图 3 19—1 线 ΔZ 磁异常的小波分解和已知磁性体的对应关系

Fig.3 Relationship of wavelet multi-scale decomposition of ΔZ magnetic anomalies and known magnetic object
 a. ΔZ 磁异常的小波分解和已知磁性体的正演; b. 已知磁性体

矿开采、钻探等钢铁制品干扰).

二阶细节场源似深度 144 m, 三阶细节场源似深度 235 m(图未列出), 反映地表至 200 多米深铁矿体的磁异常, 异常特征为正负伴生, 两侧都有负值, 表明铁矿体是下延有限的形体. 这个深度上的小波细节反

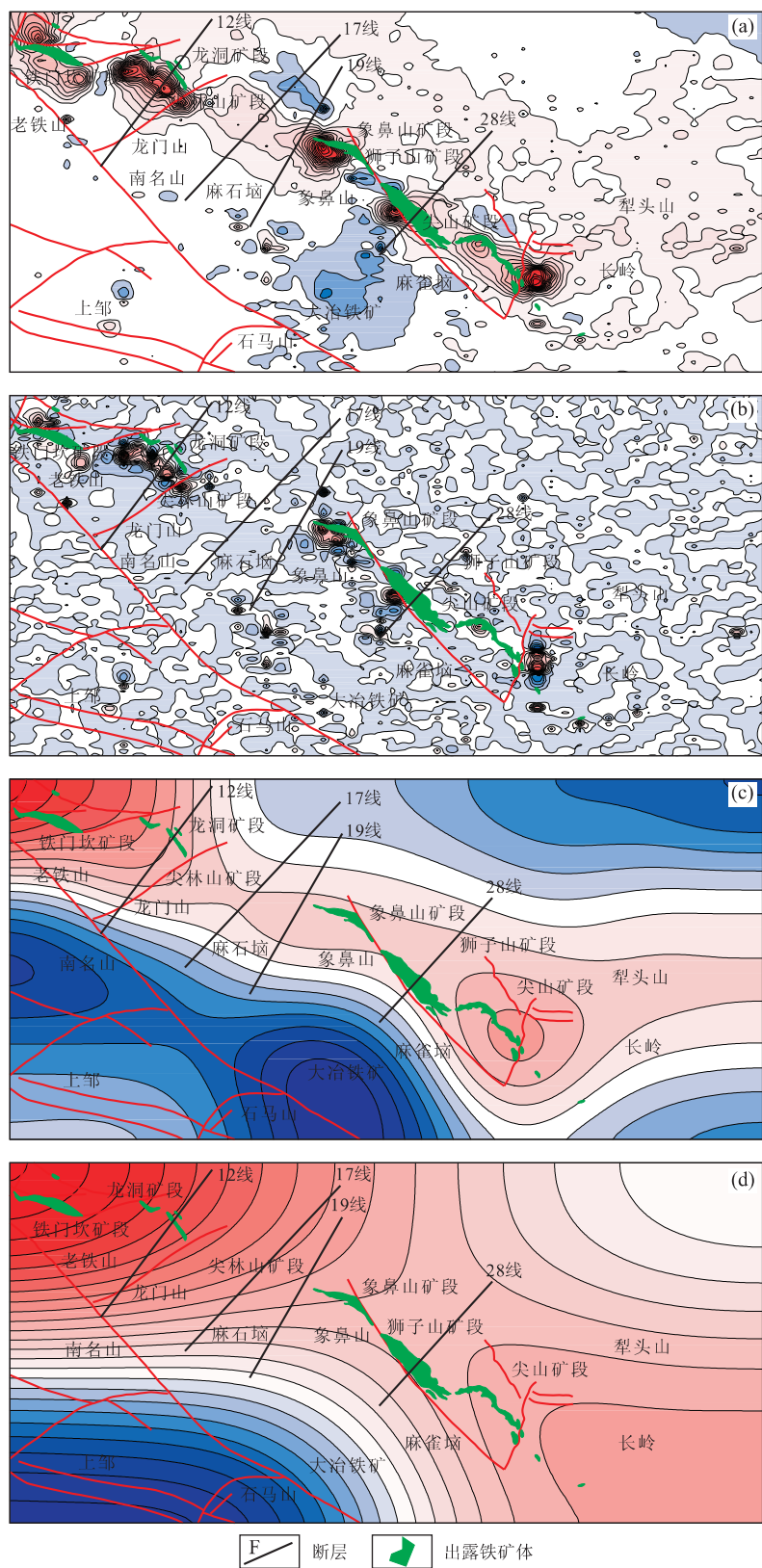


图 4 大冶铁矿 ΔZ 磁异常及小波多尺度分解结果

Fig. 4 ΔZ magnetic anomalies and wavelet multi-scale decomposition of Daye iron mines

a. 原始 ΔZ 磁异常; b. 小波多尺度分解一阶细节; c. 小波多尺度分解五阶细节; d. 小波多尺度分解五阶逼近

映的结果与该矿区已开采的铁矿吻合较好。四阶细节场源似深度 488 m(图未列出),图中磁异常正负伴生,正异常幅值大于 1 000 nT,两侧有负异常伴生,表明 500 m 左右深度仍有磁性强的铁矿体存在。

五阶细节场源似深度 912 m(图 4c),西段已经看不出明显局部异常,推测在 1 000 m 深以下不太可能有铁矿体存在。而东段尖山—犁头山一带,在五阶细节上有 400 nT 局部异常,推测该处深部磁性体埋深 1 000 m 左右,从异常特征看,东段尖山—犁头山磁性体要比中西段尖林山、龙洞埋藏深。但西北角的铁门坎区还存在有强度大于 800 nT 没有闭合的正异常(图 4c),是深部区域场,还是与局部异常有关,由于异常已不在图内,尚不清楚其性质,但是从异常特征看,它与尖山—犁头山段局部异常特征完全不一样。而五阶逼近(场源似深度 912 m)为西南负、东北正的磁场特征,反映大冶铁矿区西南部为无磁性大理岩,而东北部为具磁性的闪长岩体(图 4d)。

4 结论

(1)理论模型分析结果表明,小波多尺度分解与谱分析方法结合来提取某一深度地质体产生的磁异常比常规的空间延拓、高次导数、匹配滤波等方法要好。(2)四阶小波细节有明显剩余磁异常存在,推测在 500~600 m 以下可能还有铁矿体存在,而西段(尖林山、龙洞、铁门坎)五阶小波细节已无剩余异常存在,推测在 1 000 m 以下已没有特别大型的铁矿体存在。因为埋深 1 000 m 的小铁矿体在地表产生的磁场十分微弱,则浅表采空区、回填区、围岩形态

大小或磁性参数稍有偏差就会产生超过深部铁矿体的异常,但在东段(尖山、犁头山)五阶小波细节还有剩余异常,推测深部(1 000 m)可能还有铁矿体,应深入研究。(3)利用小波多尺度分析方法结合人机交互反演方法推断 15~12 线有铁矿体,2005 年 9 月根据解释结果布钻,在 15~1 线打到 30 多米厚磁铁矿体。

References

- Bhattacharyya, B. K., Lei, K., 1975. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structure. *Geophysics*, 40:993—1013.
- Gao, D. Z., Hou, Z. Z., Tang, J., 2000. Multi-scale analysis of gravity anomalies on East China Sea and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.*, 43(6): 842—849 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Z., Yang, W. C., 1997. Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomalies of China. *Chinese J. Geophys.*, 40(1): 85—95 (in Chinese with English abstract).
- Spector, A., Grant, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35:293—302.
- Yao, P. H., 1993. Iron-mine history of China. Metallurgical Industry Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

- 高德章,侯遵泽,唐健,2000. 东海及邻区重力异常多尺度分解. *地球物理学报*, 43(6): 842—849.
- 侯遵泽,杨文采,1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. *地球物理学报*, 40(1): 85—95.
- 姚培慧,1993. 中国铁矿志. 北京:冶金工业出版社.