

技术方法

## \* 浅谈 2.5D 磁法反演估算铁矿资源量的多解性

李土雄, 马兆同, 赵法强

(山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013)

**摘要:** 2.5D 磁法反演估算铁矿资源量, 关键是在垂直磁异常走向上求拟合模型的截面积。该文利用一种常见模型拟合 4 种实测磁场, 发现铁矿截面积与埋深和磁性大小有一定的规律: 磁化强度一定时, 截面积与埋深呈线性正相关; 埋深一定时, 截面积与磁化强度呈近似指数形式的反相关。固定深部或外围磁性体参数, 单独考虑浅部或中间铁矿模型时也有这种规律。在无钻孔资料及磁性资料不清楚时, 磁化强度  $100\ 000 \times 10^{-3} \sim 150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  为估算铁矿资源量的最佳磁参数。因磁法反演的多解性, 此类方法适用于钻孔验证前的资源量估计。

**关键词:** 铁矿资源量; 反演; 磁法; 埋深; 磁性

**中图分类号:** P631.2

**文献标识码:** B

铁的品位影响铁矿体的磁性大小, 确定铁矿工业品位的因素包括地质因素, 当埋深较大时开采成本高, 工业品位应升高<sup>[1]</sup>。磁法估算磁铁矿资源量需要经过定性、半定量及定量解释的过程。定性解释查明铁矿体成矿类型、形态、走向、倾向等基本信息。半定量解释对铁矿体埋深、磁性有一个大概认识, 包括特征点法、外奎尔法、切线法、3D 物性自动反演法等。该文使用的定量解释方法为 2.5D 剖面反演方法, 软件为中国地质调查局发展研究中心开发的 RGIS 软件。当铁矿埋深或磁性不确定时反演结果有多解性, 该文对 4 种实际磁场作了反演, 以分析此方法估算资源量的不确定程度。

## 1 影响铁矿资源量的主要参数

2.5D(二维半)磁法反演技术, 是以二维半具有多边形截面、沿走向延伸有限的水平棱柱体模型作为场源体的初始模型, 并根据地质先验、物性资料和半定量解释结果, 对所有参数估计初始值进行设置, 而后采用人机交互修改, 计算机自动迭代反演相结合的方式, 求取地下磁性地质体埋深、空间形态和体积的技术<sup>[2]</sup>。

在垂直磁异常走向上均匀布置数条剖面, 对每条磁场曲线进行模拟反演。根据模型截面积  $S$  和异

常走向长度  $L$  及铁矿石比重  $\sigma$  按下式计算铁矿石资源量。

$$Q_{\text{铁矿石}} = k \times \sigma \times \int (S \times L) dL \quad (1)$$

其中  $k$  为含矿系数, 如果积分式用数条拟合剖面计算, 则还需考虑磁异常形态系数。如果每条剖面上的模型截面积与实际矿体截面积相同, 则积分的结果就是实际矿体体积。因此资源量的主要影响因素为拟合模型截面积。

## 2 反演拟合模型的选择

从山东颜店、东平等地区地磁异常提取了 4 种磁异常剖面(如图 1, 其中 L2 线放大表示), 磁异常区别为: L1 到 L4 磁异常峰值(减去背景场)分别为 785 nT, 215 nT, 6 783 nT, 5 475 nT, 宽度分别为 1 600 m, 80 m, 576 m, 1 200 m, 走向长度分别为 2 000 m, 100 m, 1 000 m, 3 000 m, 其中 L4 斜磁化伴生负磁异常。

山东省磁铁矿床主要类型为变质沉积型及接触交代型<sup>[3]</sup>。据其地质成矿特征假设铁矿反演模型(表 1), 对常见的模型参数进行了假定, 不限制的参数有拟合模型的空间形态、高度及宽度、模型个数、埋深; 限制范围的参数有倾角、磁化强度; 限制的参

\* 收稿日期: 2011-01-11; 修订日期: 2011-04-16; 编辑: 曹丽丽

作者简介: 李土雄(1985—), 男, 湖南郴州人, 主要从事野外物探工作及室内资料研究工作; E-mail: lituxiongtx@sina.com。

数有倾向、层数。通常磁化强度大于  $20\ 000 \times 10^{-3}$  A/m 的反演模型可视为磁铁矿产<sup>[4]</sup>, 此处磁化强度限制范围为  $(20\ 000 \sim 30\ 000) \times 10^{-3}$  A/m。其中 L1 线围岩段对应围岩模型的所有参数固定, 研究段的铁矿模型参数可变, 以研究铁矿具有外围已知磁性体时的情况。

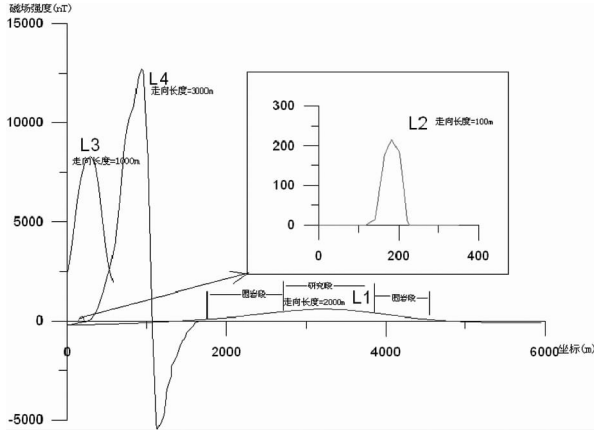


图1 4种实测垂直磁异常曲线图

### 3 拟合铁矿模型截面积与埋深及磁性 J 的关系

#### 3.1 截面积与埋深的正相关性

拟合铁矿模型埋深随形态变化而变化, 图2为 L1 线有效磁化强度为  $40\ 000 \times 10^{-3}$  A/m 时的不同埋深的拟合模型, 埋深较小时模型为多个较窄矩形, 随着埋深的加大, 模型由分散变集中, 最后汇聚成近似单个椭圆形。这两种模型形态为拟合模型形态的极值, 对应埋深为拟合模型埋深的允许范围。

经反演计算, L1 线拟合铁矿模型的截面积  $S$  与模型平均埋深  $H$ 、有效磁化强度  $J$  的关系如图3所示。图3中, 符号“+”代表某一深度及磁化强度时的拟合截面积, 直线表示它们以磁化强度来分类时的趋势。由该图可知, 在有效磁化强度为  $20\ 000 \times 10^{-3} \sim 250\ 000 \times 10^{-3}$  A/m 范围内, 相同磁化强度时模型截面积与埋深近似呈线性正相关, 斜率与磁化强度的大小成反比。因模型形态的不确定, 每个磁化强度都有一个模型埋深的允许范围, 对应截面积是一个有界区间。边界与磁化强度的大小有关。

表1 常见地质-地球物理模型及该次反演模型对比

模型类别	空间形态	倾向及倾角	高度及宽度	层数及个数	空间位置	矿石特征
地质模型	囊状、透镜状、鞍状、脉状等	均受接触带、地层、岩体、构造、裂隙控制	单层、多层、矿脉个数	层距、埋深	mFe 含量	
地球物理模型	矩形、三角形、圆形、梯形截面等	模型倾向、倾角	模型体高度、宽度	模型层数、个数	层距、埋深	磁化强度
该次反演拟合模型	形态随埋深变化	倾向一定, 倾角较陡, $60^\circ \sim 90^\circ$	不定	单层或双层, 个数不定	双层层距约 100m, 埋深不定	$20000 \times 10^{-3} \sim 300000 \times 10^{-3}$ A/m

地质模型据《山东地勘读本》归纳<sup>[4]</sup>

对磁化强度等于  $20\ 000 \times 10^{-3}$  A/m、 $100\ 000 \times 10^{-3}$  A/m 做了双层模型的拟合, 层间距  $60 \sim 150$  m 不等。双层模型(以“o”标记)的拟合结果与单层模型拟合结果相差不大。

#### 3.2 截面积与磁性 J 的反相关性

在双对数坐标下绘制埋深一定时截面积与磁化强度  $S - J$  关系图(图4), 埋深在 650 m, 850 m, 1 050 m, 1 250 m 时的  $S - J$  关系曲线均近似为直线, 截面积与磁性  $J$  呈指数形式的反相关。

埋深 400 m 对应的截面积与磁化强度关系曲线是还有深部矿体时, 单独考虑浅层矿体所作的, 此时层间距约 250 m, 截面积与磁性  $J$  的关系也具有指数形式的反相关, 而且指数相近。

#### 3.3 两种斜率 $k(J)$ 及 $\alpha(H)$ 的大小

$k(J)$  表示图3中  $S - H$  直线斜率, 它与磁化强度有关;  $\alpha(H)$  表示图4中  $\log_{10} S - \log_{10} J$  直线斜率, 它与埋深有关。综合其余3条异常剖面的拟合结果, 发现截面积与埋深和磁性  $J$  的关系也有上述同样的规律, 可用公式描述这种关系:

$$S(H, J) = S_0 \times \left(\frac{J}{J_0}\right)^{\alpha(H_0)} + k(J) \times (H - H_0) \quad (2)$$

式中  $S_0$  为某一埋深  $H_0$ 、磁化强度  $J_0$  时的模型截面积。如果求得任意2个拟合截面积, 以  $S_1(H_1, J_1)$ 、 $S_2(H_2, J_2)$  表示, 并假设  $\alpha(h) \equiv -1$ , 则(2)式可近似表示为式(3)。

$$S(H, J) = (AH + B) \times J^{-1} \quad (3)$$

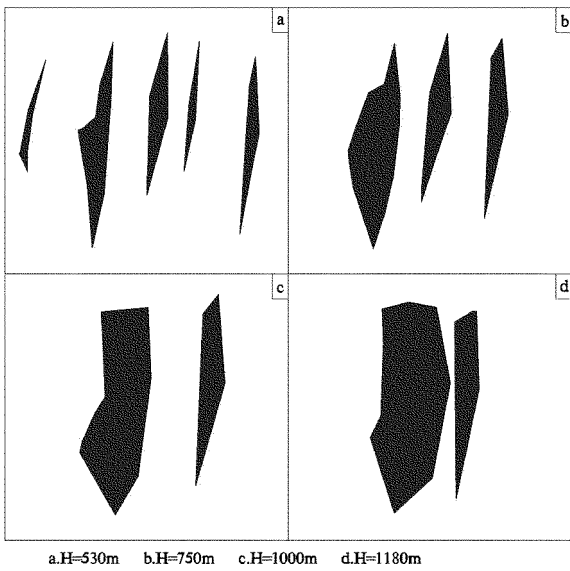


图2 拟合铁矿模型形态与埋深关系示意图

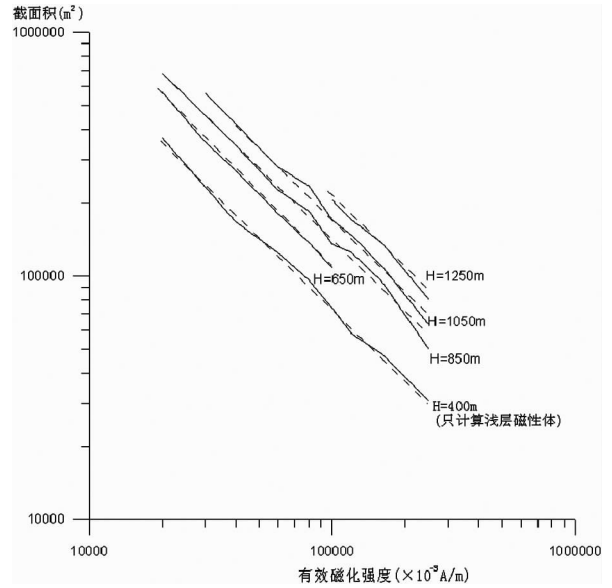


图4 L1埋深一定时模型S-J(双对数)关系图

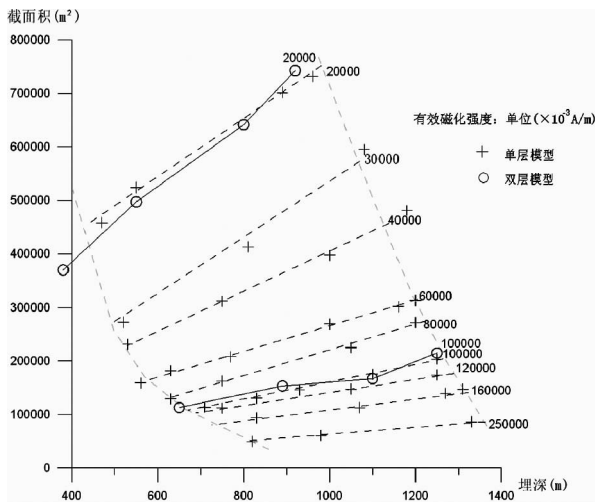


图3 L1磁化强度一定时模型S-H关系图

$$\begin{cases} A = \frac{S_2 J_2 - S_1 J_1}{H_2 - H_1} \\ B = S_1 J_1 - A H_1 \end{cases}$$

由(2)式和(3)式可知,  $k(J) = A/J$ 。由式(3)计算的截面积与实际拟合截面积具有一定的相对误差,如表2所示,均方相对误差5%~10%,上述相关性规律是近似的。

表2 计算截面积与拟合截面积均方相对误差

磁场	点数	$\alpha$	误差	范围(>10%比率)
L1	36	-1.00	5.51%	0~21% (19%)
L2	41	-1.00	9.82%	0~28% (46%)
L3	37	-1.00	7.18%	0~21% (43%)
L4	32	-1.00	9.53%	0~25% (50%)

### 4 铁矿模型截面积误差估计及最佳磁性参数段

在第四系覆盖区、深部找矿等领域中,当没有钻孔资料且磁性大小不清楚时,磁法估算的铁矿资源量与使用的磁化强度关系较大。为了估计磁性J对截面积的影响大小,对4个磁场剖面做了已知磁化强度为某一值(单点)或某个区间时,截面积有界解的最值与中值的相对误差M。对4条磁场剖面的实际拟合结果都进行磁化强度为单点和区间的统计,其中区间磁化强度的中点作为统计点表示(图5)。

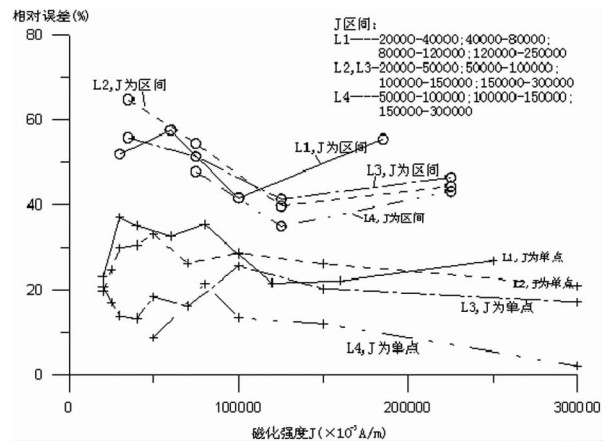


图5 截面积最值与中值相对误差统计

磁化强度为一个数值时,相对误差在磁化强度小于  $100\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  时发散(10%~38%),大于  $150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  时也发散(2%~26%),当磁化

强度属于  $100\ 000 \times 10^{-3} \sim 150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  时误差收敛(13% ~ 26%, 均值为 20%)。

磁化强度为一个区间时,如图 5 中的分段方式,各区间间距不等,以表示磁性强度的 4 种等级:最低、较低、较高、最高,大致为  $20\ 000 \times 10^{-3} \sim 50\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ,  $50\ 000 \times 10^{-3} \sim 100\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ,  $100\ 000 \times 10^{-3} \sim 150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  和  $150\ 000 \times 10^{-3} \sim 300\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 。相对误差(误差为散点,用直线连接以区分各剖面)均较收敛,误差范围 30% ~ 65%,磁性段  $100\ 000 \times 10^{-3} \sim 150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  对应误差最小约 40%。

当铁矿有效磁化强度不清楚时,如果用  $100\ 000 \sim 150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  中的某个数值作为磁参数,由此时截面积误差的收敛性,资源量的误差趋于某个数值,即能更好地反映三维地质实际。且此中等磁化强度能适中的反映铁矿储量,因此可作为最佳铁磁性参数。

### 5 应用实例

以山东省颜店铁矿地磁异常为例,如图 6 所示,磁异常幅值 3 800 nT。根据 ZK3 孔、ZK4 孔和 ZK7 孔钻孔资料可知,赋矿地层济宁群变质岩上部为寒武、奥陶及第四系覆盖<sup>①</sup>。近几年陆续在异常上布置了 4 线、39 线钻孔勘探线。

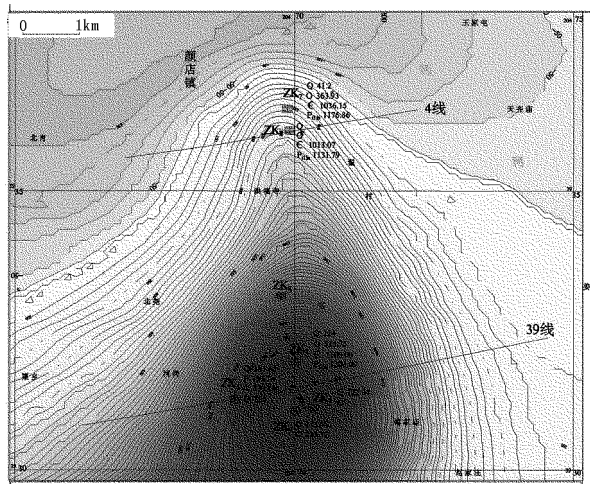


图 6 山东省颜店地区垂直磁力异常图

因该地区铁矿石剩磁资料不详,用与 4 线已知铁矿截面完全重合的铁矿模型磁参数  $136\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  作为 39 线的拟合参数。在 39 线已知铁矿上的拟合模型截面积与真实铁矿截面积的比为

108%。因此该方法在有钻孔资料时估算铁矿资源量是有效的。

如果没有钻孔控制埋深及可靠磁性资料,则估算的资源量具有不确定性。铁矿模型的磁化强度分别使用  $80\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ,  $120\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ,  $160\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ , 将 4 线、39 线拟合铁矿模型截面积的最小值和最大值(单位  $\text{m}^2$ ),及按第 4 节计算的相对误差 M 列于表 3。拟合时在异常中心的两侧有固定的外围磁性体。

由表 3 可知,磁化强度  $80\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ ,  $160\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  时对应的两条线的拟合截面积误差相差较大,分别为 17.5%, 4.6%。

磁化强度  $120\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  时则较小为 0.2%,若按梯形近似计算 4 线和 39 线间的铁矿体积,线距约 4 575 m,铁矿体积  $V_{\min} = (111996 + 610047) \times 4575/2 = 1651673363$ ,  $V_{\max} = (173735 + 949626) \times 4575/2 = 2569688288$ , 体积中值  $2110680825 \text{ m}^3$ ,误差约 21.7%。

因此在不知道铁矿石磁性大小的情况下,用最佳磁性段中的某一数值作为反演参数,各剖面拟合模型截面积的误差较稳定,用二维半剖面方法计算出的资源量能较好的反映三维地质实际。

表 3 3 种磁化强度拟合截面积相对误差比较

J( $10^{-3} \text{ A/m}$ )	勘探线	最小 S	最大 S	M(%)
80000	4	129593	271694	35.4
80000	39	930000	1335062	17.9
120000	4	111996	173735	21.6
120000	39	610047	949626	21.8
160000	4	93874	147305	22.2
160000	39	464058	803870	26.8

### 6 结语

(1) 二维半磁法反演拟合模型截面积与铁矿埋深和磁化强度存在一定的规律。合适的固定深部或外围磁性体的参数,单独计算浅部或中间铁矿体截面积,它与埋深和磁化强度也有这种规律。

(2) 在磁性大小不清楚的情况下,  $100\ 000 \times 10^{-3} \sim 150\ 000 \times 10^{-3} \text{ A/m}$  可作为反演拟合的最佳铁磁性

① 马兆同、万国普、黄太岭等,山东省物化探勘查院,山东省济宁大磁异常区综合物探技术与地质找矿研究报告,2008 年 12 月。

参数段,此时因埋深的不确定,用埋深中值进行拟合,计算的铁矿体积误差约20%。

(3)若磁参数使用最佳铁磁性参数段中的某个数值,埋深使用拟合允许范围内的中值,则估算的资源量最适宜作为该类方法在磁异常钻孔验证前的铁矿资源量估计值。

## 参考文献:

- [1] 杨坤光,袁晏明.地质学基础[M].武汉:中国地质大学出版社,2009.
- [2] 管志宁.地磁场与磁力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [3] 李锋,孔庆友,张天祯,等.山东地勘读本[M].济南:山东科学技术出版社,2002.
- [4] 范正国,黄旭钊,熊盛青,等.全国矿产资源潜力评价技术要求系列丛书-磁测资料应用技术要求[M].北京:地质出版社,2010.

# Discussion About Multiplicity Of Estimation On Ironore Resource With 2.5D Magnetic Method Inversion

LI Tuxiong, MA Zhaotong, ZHAO Faqiang

(Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Shandong Jinan 250013)

**Abstract:** 2.5 D inversion of magnetic method estimate ironore resources, the key is the model's sectional area in the vertical towards of magnetic anomaly. This paper using a common model to simulate four measured magnetic field, found ironore's sectional area and buried depth and magnetic size have certain laws: when magnetized strength is certain, sectional area and buried depth have linear positive correlation, when Buried depth is certain, sectional area and magnetic size have inverse correlation of exponentially forms. Fixed deep or peripheral magnetic model's parameters, when considering only shallow or intermediate ironore model also have this laws. Without the borehole data and magnetic data is not clear, the scope that is 100,000 between 150,000 ( $10^{-3}$  A/m) is the best magnetic parameter for estimation on ironore esources. Because the multiplicity on Magnetic Method Inversion, this method apply to resource's estimation before validation of borehole.

**Key words:** Iron ore resources; inversion; magnetic method; Buried depth; magnetism