

利用井中磁方位异常判断磁性体位置的方法

杨坤彪¹, 陶德益², 范新省¹

(1. 中国冶金地质总局 西北地质勘查院, 陕西 西安 710061; 2. 中国冶金地质总局 中南地质勘查院, 湖北 武汉 430081))

摘要:根据国产井中磁力仪能计算钻孔中无磁干扰井段磁方位角, 而引入受水平磁异常干扰产生磁方位异常 $\Delta\beta$ 的概念; 并阐明 $\Delta\beta$ 的符号与水平磁异常 ΔH 方向的对应特性, 从而得出磁方位异常 $\Delta\beta$ 曲线图型与磁性体相对于钻孔位置的关系, 提出为井中磁测定位解释的一个辅助参量。

关键词:磁方位角; 磁方位异常; 水平磁异常; 磁性体位置

中图分类号: P631.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2010)06-0000-05

我国井中磁测的发展与应用已有 40 多年历史。20 世纪 60 年代初, 原冶金部地质研究所先后研制成功井中单分量和三分量磁力仪, 为了适应生产需要, 原地质部上海和重庆地质仪器厂, 在冶金系统研制的井中三分量和五分量磁力仪样机的基础上, 进行改进并批量生产, 在实际生产中取得广泛应用。与此同时, 地矿部第一物探队 101 队及大专院校, 对井中磁测的方法技术和推断解释理论进行了系统的研究和实践, 有力的推动了井中磁测工作的发展。

前人对井中磁测的基本理论、井中磁异常的初步解释、定量计算及其应用, 都做了详尽的研究和论述。笔者在此基础上根据国产井中磁力仪能计算钻孔中无磁干扰井段磁方位角、顶角的特点, 引入受水平磁异常对方位的干扰产生磁方位异常的概念, 作为井中磁测定位解释的一个辅助参量。

在磁性体外磁场涉及的空间, 其水平磁异常将会影响磁方位值。以有磁性影响的磁方位值减去无磁性影响的磁方位值, 其差定义为磁方位异常。磁方位异常的“+”、“-”符号与水平磁异常指向东或西侧具有对应关系。因此, 可以引用磁方位异常作为井中磁测定位解释的一个辅助参量。

1 磁方位异常

1.1 磁方位异常的含义

井中磁测属对观测点磁场的绝对测量。使用国产测磁系统的井中三(五)分量磁力仪, 可以测算出无磁干扰时的磁方位角(图 1)。

设 y 方向(即井下仪倾斜方向)的磁方位角为 β ;

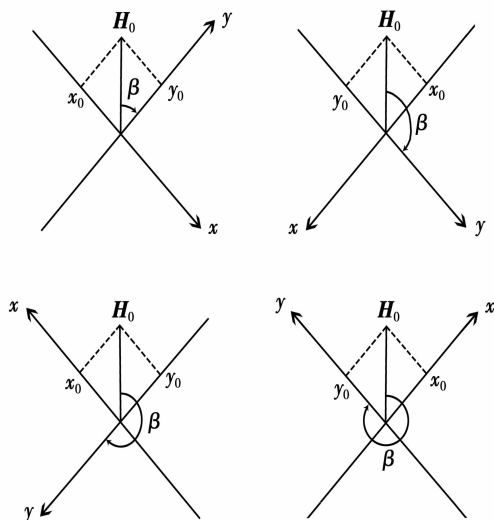


图 1 磁方位计算示意

x 方向在 y 的右侧交 90° 为正向。正常水平地磁场 H_0 的两个水平分量为 X_0 、 Y_0 。令 $\alpha = \arctan |x_0/y_0|$, α 为正常水平磁场 H_0 ($= \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$) 与井下仪 Y 轴所夹的锐角, 其关系如图 1 所示, 则有

$$\beta = \begin{cases} \alpha, & x_0 < 0, y_0 > 0; \\ \pi - \alpha, & x_0 < 0, y_0 < 0; \\ \pi + \alpha, & x_0 > 0, y_0 > 0; \\ 2\pi - \alpha, & x_0 > 0, y_0 < 0. \end{cases}$$

若存在磁异常, 则观测点的水平磁场 H 由 H_0 与水平磁异常 ΔH 合成 ($H = H_0 + \Delta H$), 其模值 $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, 这时按上式计算的 β 值是以 H 方向当作磁北的 Y 向方位角, 称为视磁方位角, 以 β' 表示(图 2)而 Y 向的磁方位 β 仍以磁北(H_0 方向)为基准。

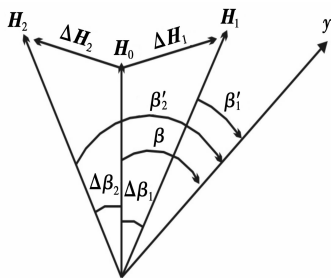


图2 视磁方位角与磁方位异常

通常 $\beta \neq \beta'$, 其差异由 ΔH 所引起。如图2中 Y 向的磁方位为 β , 存在 ΔH_1 时, 视磁方位为 β'_1 ; 存在 ΔH_2 时, 视磁方位为 β'_2 。令磁方位异常 $\Delta\beta = \beta' - \beta$; $\beta'_1 < \beta, \Delta\beta_1 < 0$; $\beta'_2 > \beta, \Delta\beta_2 > 0$ 。可见, 磁方位异常 $\Delta\beta$ 是水平磁异常引起的磁偏角差异, 它因水平磁异常 ΔH 不同而异, 且有正负值。

1.2 磁方位异常的表达式

设 H_0 为正常水平磁场值, H 为水平磁场值, 某点水平磁异常 ΔH 的模为 ΔH , 其磁方位为 φ , ΔH 引起的磁方位异常为 $\Delta\beta$ 。 H_0 和 H 在两水平轴上的投影分别为 H_{0x}, H_{0y} 和 X, Y , 水平磁异常 ΔH 在两水平轴上的投影分别为 $\Delta X, \Delta Y$ 。图3中, $\beta' < \beta, \Delta\beta$ 为负值。由图可知

$$\Delta\beta = \arctan \frac{\Delta H \sin\varphi}{H_0 + \Delta H \cos\varphi}$$

或

$$\Delta\beta = \arctan \frac{\Delta Y \sin\beta + \Delta X \cos\beta}{H_0 + \Delta Y \cos\beta - \Delta X \sin\beta}$$

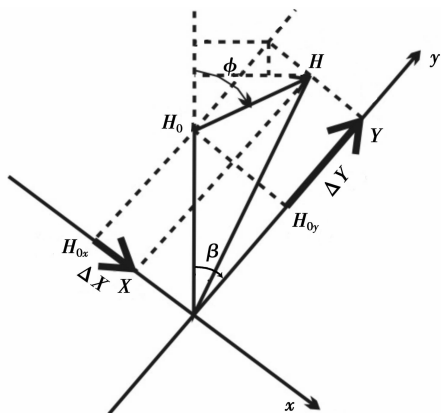


图3 磁方位异常、水平磁异常关系

1.3 磁方位异常的主要特点

(1) 对于确定的 ΔH 值, $\Delta\beta$ 随水平磁异常 ΔH 的方位 φ 而改变。求引起磁方位异常最大值 $|\Delta\beta|_{\max}$ 的水平磁异常 ΔH 方位角时, 令 $\partial\Delta\beta/\partial\varphi = 0$, 则有 $H_0 \cos\varphi + \Delta H = 0$, 因而 $\cos\varphi = -\Delta H/H_0$, 所以 $\varphi = \pi \pm \arccos(\Delta H/H_0)$, 即应满足如图4所示 ΔH 与 H_0 组成以 H_0 为斜边的直角三角形。图中 $\varphi_1 = \pi - \arccos(\Delta H/H_0)$, $\varphi_2 = \pi + \arccos(\Delta H/H_0)$, 这时, $\Delta\beta$ 的极值为

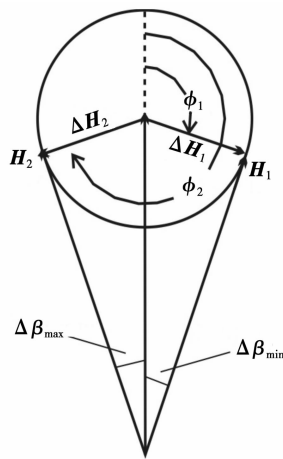


图4 磁方位异常的极值系

$\cos(\Delta H/H_0), \varphi_2 = \pi + \arccos(\Delta H/H_0)$, 这时, $\Delta\beta$ 的极值为

$$\Delta\beta_{\max} = \arctan \frac{\Delta H}{H_0} = \arctan \frac{\Delta H}{\sqrt{H_0^2 - \Delta H^2}}$$

$$\Delta\beta_{\min} = -\arctan \frac{\Delta H}{H_0} = -\arctan \frac{\Delta H}{\sqrt{H_0^2 - \Delta H^2}}$$

可见, 在 H_0 一定的区内, $\Delta\beta$ 的极值可由 ΔH 模值计算得出, 以 $\Delta\beta_m$ 表示水平磁异常 ΔH 能引起的最大磁方位异常值, 有

$$\Delta\beta_m = \arctan \frac{\Delta H}{H} = \arcsin \frac{\Delta H}{H_0} = \arccos \frac{H}{H_0}$$

由此可见, 引起最大磁方位异常值 $\Delta\beta_m$ 的水平磁异常 ΔH , 水平磁场 H , 和水平模差 $\Delta H'$ 分别为

$$\Delta H = H_0 \sin(\Delta\beta_m),$$

$$H = H_0 \cos(\Delta\beta_m), \Delta H' = H_0 [\cos(\Delta\beta_m) - 1].$$

由于国产井中五分量磁力仪可以计算孔斜方位和顶角, 因此这一特点, 对于利用井中磁测资料计算孔斜方位的可行性分析, 具有实际意义。

(2) 磁方位异常的符号与水平磁异常 ΔH 指向的关系。讨论存在水平磁异常的情况, 若 $\Delta H \neq 0$, 则

$$\Delta\beta = \arctan \frac{\Delta H \sin\varphi}{H_0 + \Delta H \cos\varphi}$$

可写为

$$\Delta\beta = \arctan \frac{\sin\varphi}{(H_0/\Delta H) + \cos\varphi}$$

由于一次场大于二次场, $H_0 > \Delta H, H_0/\Delta H > 1$, 所以上式的分母项大于0, 则磁方位异常 $\Delta\beta$ 的符号取决于 $\sin\varphi$ 。

当 $0 < \varphi < \pi$, 水平磁异常 ΔH 指向以磁北剖面为界的东侧时, $\sin\varphi > 0$, 则 $\Delta\beta < 0$, 为负值; 当 $\pi < \varphi < 2\pi$, 水平磁异常 ΔH 指向以磁北剖面为界的西侧时, $\sin\varphi < 0$, 则 $\Delta\beta > 0$, 为正值。因此, $\Delta\beta$ 的符号表

征着水平磁异常 ΔH 指向偏东或偏西,要判定水平磁异常 ΔH 指向偏东或偏向西,并不需要算出 $\Delta\beta$ 的数值,而只要确定其符号。 $\Delta\beta$ 为正值, ΔH 指向偏向西; $\Delta\beta$ 为负值, ΔH 指向偏东。

2 磁性体外水平磁异常的基本分布特征

井中磁测相对于地面磁测而言,在建立磁异常正演概念方面,地面磁测通常只研究半空间问题,井中磁测需研究全空间问题。要通过测定磁场来确定磁性体的位置,必须了解磁性体外磁场的基本分布特征。为此,对有限倾斜板状磁性体的体外全空间磁场各分量进行理论计算,来了解其分布特征。可经计算整理,得出磁性体外上部、中部和体外下部,各水平切面中的磁力线的水平切向。

磁性体场域的分量值,可等效为某极性的磁荷所引起,体外磁场的分布,显示遵循一定规律性特征。以假想的磁力线来描述磁场,它由正磁荷源发散,聚集于负磁荷源。基于我国所处地球地理位置,磁化场指向北的下方。因而在磁性体外上部水平切面中,磁力线切向呈聚集状向等效负磁荷源收敛;在体外下部磁力线呈发散状,自等效正磁荷源向四周发散;在平切磁性体(或靠近)的水平切面中,磁力线水平切向呈北散南聚状。

上述特征可等效如图 5 所示,图中 P_1 、 P_2 、 P_3 分别为体外上部、平切体、体外下部的水平切面。

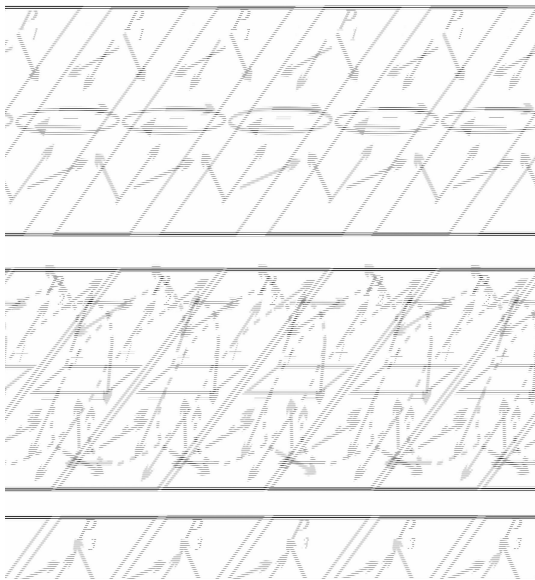


图 5 磁体外上中下水平切面磁力线水平切向

若能判断磁异常水平分量的指向沿井轴自上而下的变化状况,就可以根据上述磁力线的水平切向分布特征来判定磁性体相对于钻孔的方向。

由于水平磁异常指向东或西侧,它与磁方位异

常 $\Delta\beta$ 的正负符号具有对应关系,因而可根据 $\Delta\beta$ 来判定磁异常水平分量的指向,从而确定磁性体的位置。

3 磁方位异常的符号与磁性体位置的关系

对有限板状磁性体周围八个钻孔的情况进行分析。图 6 中 P_1 、 P_2 、 P_3 为自上而下的三个水平截面,讨论磁性体周围某一钻孔时,均可根据 ΔH 的指向偏东或偏西得知 $\Delta\beta$ 的符号。因此,磁性体周围孔中沿井轴 $\Delta\beta$ 的变化有下述特征。

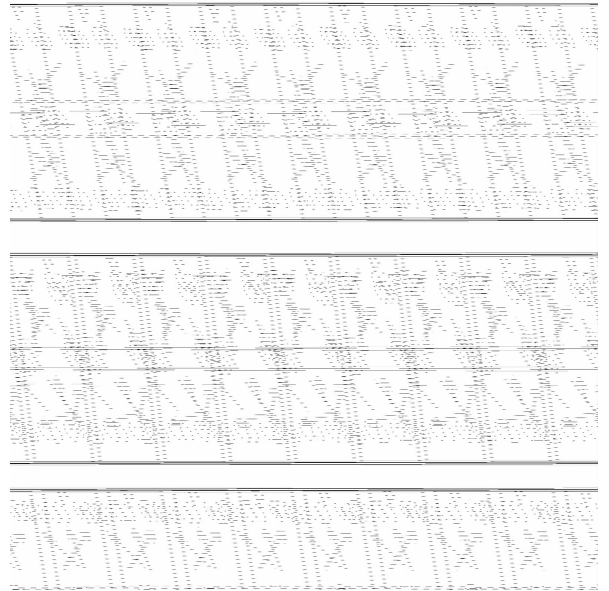


图 6 磁体外上中下水平切面与孔位

(1)中心剖面附近的钻孔(如①②), ΔH 与磁北基本平行,因而 $\Delta\beta \approx 0$ 或很小。

(2)位于磁性体东侧的孔(③⑤④孔)上部磁力线向西侧的负磁荷源收敛, ΔH 的指向偏西, $\Delta\beta$ 为正;进入平切或靠近磁性体的空间时, ΔH 的指向偏东, $\Delta\beta$ 转为负;下部磁力线由西侧的正磁荷源向东发散, ΔH 的指向偏东, $\Delta\beta$ 仍为负。沿井轴深度展示出 $\Delta\beta$ 曲线呈上正下负的反 S 型。

(3)位于磁性体西侧的孔(⑥⑧⑦孔),按上述分析, $\Delta\beta$ 沿井轴深度呈上负下正的 S 型曲线。

表 1 磁体周围孔中 ΔH 指向、 $\Delta\beta$ 符号及曲线

孔号	上部		中部		下部		曲线图形
	ΔH	$\Delta\beta$	ΔH	$\Delta\beta$	ΔH	$\Delta\beta$	
1	向南	0	向北	0	向北	0	反 S 型
2	向北	0	向北	0	向南	0	
3	偏西	+	偏东	-	偏东	-	
4	偏西	+	偏西	+	偏东	-	
5	向西	+	向南	0	向东	-	
6	偏东	-	偏西	+	偏西	+	
7	偏东	-	偏东	-	偏西	+	
8	向东	-	向南	0	向西	+	

因此,可取井深为纵坐标, $\Delta\beta$ 为横坐标,右向为角度增大正向,沿井轴展示曲线,将上述特征归纳如表 1 所述。

可见,磁性体在西侧 $\Delta\beta$ 曲线呈反 S 型,磁性体在东侧 $\Delta\beta$ 曲线呈 S 型。

4 确定磁方位异常的符号

4.1 基本方法

判断 ΔH 指向东侧还是西侧,无需考虑 $\Delta\beta$ 的数值,只要能判定是否存在 $\Delta\beta$,并确定是正还是负异常。为此,可根据上述分析从视磁方位 β' 曲线进行判断,具体方法如下。

(1) 看 β' 曲线是否有明显的变化段。

(2) 根据 ΔZ 、 ΔH 曲线分出正常或异常井段,正常井段的视磁方位近似于磁方位值($\beta' \approx \beta$)。以磁异常井段与 β' 曲线变化段对比,二者的井深对应时,定为 $\Delta\beta$ 存在。

(3) 异常段的 β' 曲线呈 C 型为负异常,反 C 型为正常。

(4) 有不受磁干扰的仪器(如陀螺仪)测定的方位资料时,则用来作为 β 曲线,判断 $\Delta\beta$ 的符号。

4.2 主要影响因素

钻孔总有一定的设计方位(以 A 表示)。由于钻孔工艺、钻进参数以及岩层受力异向性等因素的影响,钻进时往往会偏离设计方位。如以 ΔA 表示钻探因素造成的偏离,则某点的磁方位 β_i 包括设计方位和钻探偏离 ΔA_i ,即 $\beta_i = A + \Delta A_i$,故该点视磁方位包括着需要判别的水平磁异常引起的 $\Delta\beta$ 和钻探造成的偏离 ΔA 。然而,通常钻探造成的偏离远小于水平磁异常引起的磁方位异常值。

5 判定磁性体相对于钻孔的位置

若井轴周围存在磁性体,在磁场涉及空间的仪器探测范围内,沿井轴测定的磁场分量分别为 X, Y, Z ; 设垂直磁异常 $\Delta Z = Z - Z_0$, 水平模差 $\Delta H' = \sqrt{X^2 + Y^2} - H_0$, 视磁方位角 β' , 顶角 δ 。

在一定条件下, $\Delta H'$ 可视为 ΔH 的磁北分量, ΔZ 和 $\Delta H'$ 合成矢量 $\Delta T'$, 视为磁异常总矢量在磁北剖面中的投影。在磁场涉及空间的仪器探测范围内,沿井轴测定的矢量 $\Delta T'$ 向线簇会呈现收敛(矢量指向负磁荷源),或发散(矢量反延指向正磁荷源)。其指向交点在北(或南)侧,则磁性体在北(或南)侧,但尚不能确定是在东北(南东)还是北西(南西)。从而再利用 β' 曲线来判断对应的磁源是在东侧还是在西侧。

5.1 定性确定磁性体位置的方法步骤

(1) 由 ΔT 矢量图确定磁性体磁荷源的极性、深度及其处于井轴以东西剖面为界的南或北半空间。

ΔT 矢量沿井轴分布的向线簇呈收敛状为负磁荷极性(约磁体头部); 发散状为正磁荷极性(磁体尾部引起)。 ΔT 矢量收敛的正交点或发散的交点,在剖面图中井轴的左(右)侧,则相应的磁荷源在该剖面的反(正)方位那一侧。对于磁异常总矢量在磁北剖面中的投影 $\Delta T'$ 矢量,则相应的磁荷源在南(北)侧。垂直磁异常 ΔZ 曲线零值点的深度,为对应的磁荷源深度。

(2) 由 β' 曲线按前述分析判定 $\Delta\beta$ 的存在及其符号,再根据磁方位异常的特征判定磁性体在磁北剖面为界的东或西半侧。

(3) 对照在磁北剖面中的 $\Delta T'$ 矢量图及上述(2)的情况,进行综合分析进行定位解释(表 2)。

表 2 沿井轴 $\Delta T'$ 、 $\Delta\beta$ 与磁性体位置对应关系

交点	$\Delta T'$		$\Delta\beta$		磁性体	
	位于左或右	符号	形态	磁源极性	位置	
正交	右	+	反 C	磁源头部	北西	
		-	C		北东	
	左	+	反 C		南西	
		-	C		南东	
反交	右	+	反 C	磁源尾部	北东	
		-	C		北西	
	左	+	反 C		南东	
		-	C		南西	
同侧	右	上+下-	反 S	整体	北西	
		上-下+	S		北东	
	左	上+下-	反 S		南西	
		上-下+	S		南东	
反侧	左正交右反交	上+下-	反 S	南头北尾 北倾	西侧	
		上-下+	S		东侧	
	右正交左反交	上+下-	反 S	北头南尾 南倾	西侧	
		上-下+	S		东侧	

5.2 磁荷源空间坐标的计算

根据实测异常求取磁荷源的空间坐标。设 ΔT 矢量在垂直地质体的剖面(横剖面)中投影为 ΔT_{\perp} , 在平行地质体的剖面(纵剖面)中投影为 ΔT_{\parallel} , 其正

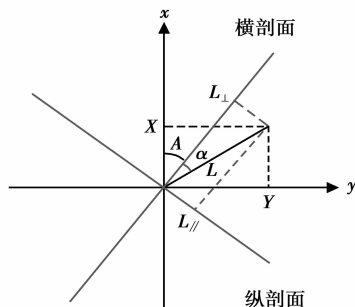


图 7 磁源相对于钻孔的位置

(反延)交点至井口的距离在横剖面中为 L_{\perp} , 在纵剖面中为 L_{\parallel} , 剖面方位为 A (图 7), 则有

$$X = \sqrt{L_{\perp}^2 + L_{\parallel}^2} \cos[\arctan(L_{\parallel}/L_{\perp}) + A]$$

$$Y = \sqrt{L_{\perp}^2 + L_{\parallel}^2} \sin[\arctan(L_{\parallel}/L_{\perp}) + A]$$

将 x, y 分别加上已知钻孔坐标的 X, Y , 则磁源的水平坐标为 $(X+x, Y+y)$ 。

6 应用实例

图 8 为大冶铁矿 44~46 线立体剖面图, ZK46-4 孔全孔为闪长岩, $\Delta T'$ 矢量在标高 50 m 处向南侧收敛, 说明南侧存在负磁荷源, 其对应井段呈方位正 $\Delta\beta$ 异常, 其下部呈现负方位 $\Delta\beta$ 异常, 曲线为反 S 形, 则矿体在南西标高 50 m 处。该结论经 ZK44-6 孔见矿所验证。而 46 线的 46-6 孔没有见矿。

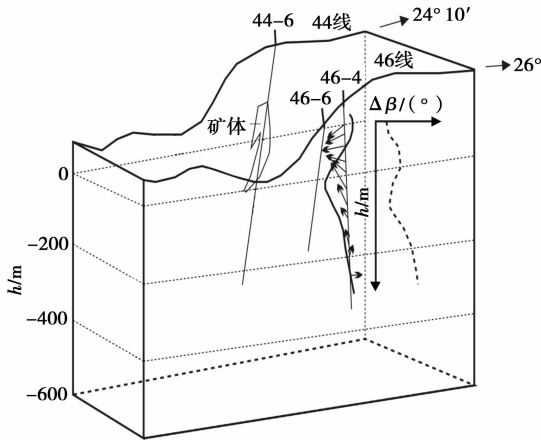


图 8 大冶铁矿 44~46 线立体剖面

图 9 为 ZK29-16 孔 ΔT_{\perp} 和 ΔT_{\parallel} 异常曲线。 $L_{\perp} = 95$ m, $L_{\parallel} = -58$ m, $A = 40^{\circ} 57' 53'' = 40.9647222^{\circ}$ 。根据上式计算出 $X = 109.67$, $Y = 18.98$, 加上井口坐标即为负磁荷源的平面坐标, 取垂直异常零值点 ΔZ 的标高为其深度高程。

7 结论

国产井中磁力仪能计算钻孔中井段视磁方位

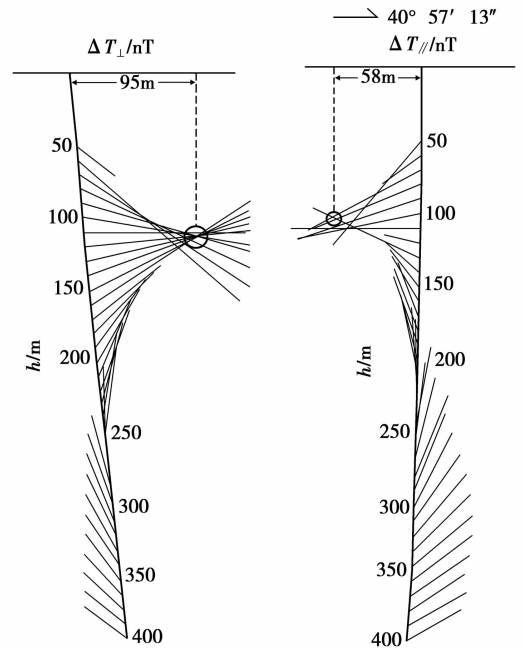


图 9 ZK29-16 孔 ΔT_{\perp} 和 ΔT_{\parallel} 异常曲线

角, 从而引入受水平磁异常影响而产生的磁方位异常 $\Delta\beta$, 根据测定的磁方位异常的符号判断磁性体相对于钻孔的位置, 是行之有效的一个解释磁性体位置的方法。可以引用磁方位异常 $\Delta\beta$ 作为井中磁测定位解释的一个辅助参量。

参考文献:

- [1] 地质矿产部第一综合物探大队. 井中磁测[M]. 北京:地质出版社, 1985.
- [2] 蔡柏林. 井中磁测物理-地质模型及其应用[M]. 北京:地质出版社, 1989.
- [3] 邵梦林, 李学圣. 利用三分量磁测井资料计算钻孔磁方位角[J]. 地质与勘探, 1972(3).
- [4] 熊选文, 邹长春. 井中三分量磁测数据转换及绘图软件的设计和实现[J]. 物探与化探, 2008, 32(6): 685-689.
- [5] 任振波, 贾京柏, 苑守成. 关于 JCX-3 型井磁仪器及其资料整理[J]. 物探与化探, 2009, 32(1): 59-62.
- [6] 王庆乙, 李学圣, 徐立忠. 高精度井中三分量磁测是矿山深部找矿的有效手段[J]. 物探与化探, 2009, 32(3): 235-239.

THE APPLICATION OF THE MAGNETIC AZIMUTH ANOMALY METHOD TO DETERMINING THE LOCATION OF A MAGNETIC BODY

YANG Kun-biao¹, TAO De-yi², FAN Xin-sheng¹

(1. Northwest Metallurgical and Geological Prospecting Institute of CMGB, Xi'an 710061, China; 2. Central-South Metallurgical and Geological Prospecting Institute of CMGB, Wuhan 430081, China)

Abstract: With the domestic borehole magnetometer, the authors calculated magnetic azimuth in the non-magnetic interference hole and

introduced the concept of $\Delta\beta$, which is called magnetic azimuth anomaly. The relationship between the symbol of $\Delta\beta$ and the direction of ΔH was clarified, and the relationship between the figure of $\Delta\beta$ and the magnetic body position was obtained. It is thus held that we can use $\Delta\beta$ as an auxiliary parameter in the calculation of magnetic source position.

Key words: magnetic azimuth angle; magnetic azimuth anomaly; horizontal magnetic anomaly; magnetic source position

作者简介:杨坤彪(1944 -), 教授级高级工程师,毕业于中国地质大学(北京),长期从事专业技术工作。获研制井中小口径五分量磁力仪器奖和多次优秀论文奖、找矿奖。