

## 第四章 磁异常的解释推断与磁力勘探的应用

磁力勘探在所有物探方法中是发展最早、应用最广泛的一种方法。不论是固体矿产的普查、详细查，还是油气构造、煤田构造的普查，以及某些地质问题研究、地质填图等工作，磁力勘探都可不同程度地发挥作用。另外，在工程地质、国防探查、地震预报、考古等方面也能发挥其作用。

应用磁力勘探解决问题的前题条件是：（1）探测对象与围岩（或周围环境）有磁性差异，由这种差异引起的磁场变化，能为现代磁力仪测出来；（2）与探测对象无关的干扰因素产生的干扰磁场与探测对象产生的磁场相比，足够小或有明显的特征，可以被分辨或消除。只要满足这两个条件，就可用磁力勘探解决问题。

### 第一节 磁异常解释的一般原则、基本方法与步骤

#### 一、一般原则

磁异常的地质解释，通常是指：根据磁测资料、岩（矿）石（目标物）的磁性资料以及地质和其它物化探资料，运用磁性体磁场理论和地质理论解释推断引起磁异常的地质原因及其相应地质体（目标体）的空间赋存状态，平面展布特征，矿产和地质构造或其它目标体分布的全过程。为实现上述过程磁异常解释应遵循如下一般原则[5]。

##### （一）以地质为依据

以地质为依据，就是要充分占有地质资料，掌握已有地质规律，建立测区内可能有的几种地质模型，以此指导磁异常的正反演解释。在解释过程中要防止简单对比与凑合地质结论，而是要善于利用磁异常与地质资料不一致的地方，经细致对比分析与深入解释提出新的见解，进而深化地质解释，修正或提出新的地质结论。

##### （二）以岩石物性为基础

岩石物性是基础，是联系地质与地球物理场的桥梁，是减少磁异常反问题多解性的重要途径，可以说，没有扎实的物性资料，就没有可靠的地质解释。把地质规律与岩石物性结合起来就可以建立合理的物理——地质模型，作为磁异常解释的初始模型。岩石物性虽有一般规律，但有更强的特殊性，必须总结出当地岩石的物性规律，不能盲目套用一般规律。以花岗岩为例，在不同地区不同围岩环境中，磁性可以是弱磁或无磁，也可以是中等或较强磁性。

##### （三）循序渐进，逐步深化

由于不同比例尺、不同网度和精度的磁测工作其解决地质问题的重点和深度不一样，一般应遵循由粗到细、由区域到局部逐渐深入细致的原则，尽量借鉴地质、地球物理条件相似地区的解释经验与方法，指导待研究区的解释工作。

##### （四）定性定量、正演与反演、平面与剖面解释相结合

定性定量解释的结合可以使两者互为补充，逐步深化；正演和反演相结合可以不断修改补充原有解释模型，减少反演解释的多解性；平面解释与剖面解释相结合，一方面利用典型剖面的精细解释、控制修正平面解释，另一方面也可利用平面解释的总体规律来指导剖面

模型建立。从而达到相互借鉴、相互补充，提高解释成果质量的目的。

## （五）综合解释

为了克服磁异常反问题的多解性以及磁力勘探应用的局限性，有条件时，应尽可能进行综合地质、地球物理解释，这样才能正确确定异常的地质原因，增进地质效果。

## （六）多次反馈，不断修正

由于地质现象的复杂性，对其认识很难一次完成，对解释工作也是如此。它主要反映在两个方面，一是在解释过程中应通过多次正反演、多次反馈不断修改物理—地质解释模型，使解释结果最佳符合当前的地质、地球物理资料；二是每当补充新的资料，或通过验证发现新问题，则又应利用反馈的资料再解释，故解释工作是一个不断反馈、解释、不断深化的过程。

# 二、磁异常解释的基本方法与步骤

磁测资料解释的内容是由磁测的任务决定的。任务不同，对解释的内容和要求也不同。虽然航磁资料 and 地面磁测资料的解释过程有所不同，但总体来说其解释步骤一般如下：

- ① 磁测资料的预处理和预分析；
- ② 磁异常的定性解释；
- ③ 磁异常的定量解释；
- ④ 地质结论和地质图示。

## （一）磁测资料的预处理和预分析

对资料进行预处理和预分析，是要使对资料的解释建立在：资料完整、可靠和便于解释的基础上。因此，在解释前应分析磁测精度的高低、测网的疏密，系统误差的有无和大小，正常场选择是否正确，图件拼接是否合理、资料是否齐全、是否有干扰影响存在等，若有问题，应改正或处理解决。此外，还应该注意分析磁性地质体的磁性特征和磁性的均匀性、方向性和大小。

为便于解释，在解释大面积磁测资料时，常需对异常进行分区、分带，确定解释单元，并网格化。多数情况下，还需对磁测资料进行必要的转换和处理，如延拓、化极、求导等。

## （二）磁异常的定性解释

磁异常的定性解释包括两方面的内容：一是初步解释引起磁异常的地质原因，二是根据实测磁异常的特点，结合地质特征运用磁性体与磁场的对应规律，大体判定磁性体的形状、产状及其分布。

对磁异常进行地质解释的首要任务是判断引起磁异常的地质原因。对找矿来讲，就是要区分哪些是矿异常，哪些是非矿异常。实际工作中，由于地质任务和地质条件的不同，定性解释的重点与方法也不同，但一般从以下几个方面着手。

**1. 将磁异常进行分类。**分类的目的是为了更好地查明异常的地质原因，便于重点研究。由于实际情况千差万别，对磁异常的分类，很难给出一个标准的分类方法。一般是根据异常的特点（如极值、梯度、正负伴生关系、走向、形态、分布范围等）和异常分布区的地质情况，并结合物探工作的地质任务进行异常分类。例如，普查时，往往先根据异常分布范围，把异常分为区域异常和局部异常。区域性异常往往与大的区域构造或火成岩分布等因素有关；局部异常可能与矿床和矿化、小磁性侵入体等因素有关。为了弄清每个异常的地质原因，对区域异常可结合地质情况，再分为强度大、而又起伏变化的分布范围也大的异常，异常强度较小而又平静的大范围分布的异常等等；对局部性异常，可结合控矿因素等分为有意义异

常和非矿异常等。

通过对异常的分类,不仅对测区异常能有一清晰的总体概念,也便于分类研究引起异常的地质原因。

**2. 由“已知”到“未知”。**由已知到未知是一种类比方法,所有物探资料的研究中都会用到。这种方法是先从已知地质情况着手,根据岩(矿)石磁性参数,对比磁异常与地质构造或矿体等的关系,找出异常与矿体,岩体或构造的对应规律,确定引起异常的地质原因,并以此确定对应规律,指导条件相同的未知区异常的解释。在推论未知区时,应充分注意某些条件变化(如覆盖、干扰等)对异常的可能影响。

**3. 深入研究区内的岩、矿石磁性。**岩、矿磁性的研究是对异常进行正确解释的重要基础工作。对区内各类岩矿石都应采集不同数量的定向标本,进行磁参数测定,了解感磁和剩磁的大小和方向。并用正演公式,粗略估算异常分布范围内各类岩矿石所引起的异常强度,然后与实测异常对比,以判断实测异常是地表还是地下深部岩、矿体所引起。如果异常分布在第四纪覆盖区,这时应充分利用附近已知区的磁参数资料。还可以根据实测异常,选择合适的公式,估算异常源的磁性大小,并与已知的同类型岩矿石磁参数比较,以提供确定异常体性质的依据。

**4. 对异常进行详细分析。**详细分析研究异常的目的,是为了结合磁性和地质情况确定引起异常的地质原因。在研究异常时,应注意它所处的地理位置,异常的规则程度,迭加特点。同时还应大致判断场源的形状、产状、延深和倾向等。

#### (1) 磁性体形状初步判断

##### A、根据磁异常的平面和剖面特征

磁异常的平面等值线形态,往往反映地下磁性体的形态。例如球状体的  $Z_a$  异常等值线为等轴状,有一定走向的地质体引起一定走向的长带状异常。如果正异常的两侧伴生有负异常,可认为磁性体为下延有限的磁性体,如只有正异常而无明显的负异常伴生,则可认为磁性体下延很大;而当正异常一侧伴生有负异常,另一侧无负异常,则判断较复杂,需具体分析。对于走向长度对异常的影响,经水平单极线与偶极线的中心剖面  $Z_a$  异常定量分析后得到:当走向长度 $>10$  埋深时中心剖面处异常的主体部份接近于二度体异常。对于有限长走向的磁性体由于斜磁化,而产生走向两端磁荷分布,使异常的走向偏离磁性体的走向,这种偏离总是使磁性体走向介于磁化方向与异常走向之间,或者说磁性体走向介于正负极值连线方向与异常走向方向之间。这种端部效应造成异常复杂化,使异常走向发生变化,极值点发生位移。

##### B、利用磁异常的空间变化特征

##### (A) 利用磁异常断面等值线特征

由第三篇第一章讨论可知,磁性体形态不同,断面磁异常等值线不同。对于厚板体及水平薄板体,  $Z_a$  断面等值线有交于两点的趋势。这两点的深度及间距分别与板体的上端和水平宽度相当。对于接触带,则在一侧有相交的趋势。对于薄板体、水平圆柱体,  $Z_a$  断面等值线则有交于一点的趋势。在实际解释中交点虽无法精确求出,但近似推定是可能的。对于下界有限的磁性体,  $Z_a$  正等值线两侧,均有负等值线,而对于接触带,则只有在一侧有负等值线。

##### (B) 利用不同高度上 $Z_a$ 曲线特征

对于无限延深薄板体  $Z_a$  曲线不同高度极大值、极小值及零值点横坐标连线相交于板顶。极大值与极小值点连线间的夹角为  $\frac{\pi}{2}$ , 极大值点连线与垂线夹角为  $\frac{\gamma}{2}$ 。不同高度水平圆柱体异常的极大点、极小点、零值点及  $\frac{1}{2}$  极值点连线也为直线且相交于圆柱中心。两侧零值点

连线之间的夹角为  $\frac{\pi}{2}$ 。极大点连线、极小点连线之间的夹角为  $60^\circ$ 。厚板状体磁异常在不同高度上各特征点连线非直线，极大值点线和极小值线之间的夹角小于  $\frac{\pi}{2}$ 。根据以上特征可以大致判别其形状。

(C) 计算形状参数  $n$

由第三篇第一章讨论可知，简单规则形体磁异常的极大值与埋深  $h$  之间有以下关系式

$$Z_{a\max} = \frac{c}{h^n} \tag{3.4-1}$$

式中  $C$  为与磁性体形状、产状和磁性有关的常数， $n$  为仅与磁性体形状和大小有关的指数。磁性体规模愈大，则  $n$  值愈小，见表 3.4-1。

表 3.4-1

形体	无限延深厚板	无限延深薄板	有限延深板体	水平圆柱体	单极	双极	球体
形体参数 $n$	$0 < n < 1$	1	$1 < n < 2$	2	2	$2 < n < 3$	3

由 (3.4-1) 式计算出  $n$  值即可估算磁性体形状。利用不同高度上的  $Z_a$  极大值，如果令

$$\frac{Z_{a\max_1}}{Z_{a\max_2}} = \alpha; \quad \frac{Z_{a\max_1}}{Z_{a\max_3}} = \beta$$

$$\text{式中: } Z_{a\max_1} = \frac{c}{h^n}, \quad Z_{a\max_2} = \frac{c}{(h + \Delta h)^n}, \quad Z_{a\max_3} = \frac{c}{(h + 2\Delta h)^n};$$

则可解得

$$n = \frac{4\alpha - \beta - 3}{16\alpha^2 + \beta^2 - 8\alpha\beta - 16\alpha + 2\beta + 5} \tag{3.4-2}$$

为了求准  $n$ ，要求  $\frac{2\Delta h}{h}$  必须  $\ll 1$ 。

(D) 由  $Z_a$ — $H_a$  参量曲线判断形状

以  $Z_a$  值为纵坐标，以  $H_a$  为横坐标，将各点的磁场值  $Z_a$  值与  $H_a$  分别点出后连成曲线根据参量曲线图的形态可以判断磁性体的形状。无限延深薄板状体  $Z_a$ — $H_a$  参量图为一圆；水平圆柱体为一心形线；无限延深厚板为一椭圆；有限延深厚板为椭圆心形线；有限延深薄板参量曲线形状接近水平圆柱体。球体的参量图为  $Z_a$  轴方向拉长的心形线。

(2) 磁性体倾向的初步判断

A、根据  $Z_a$  异常特征判断倾向

为简化起见，讨论中忽略剩磁的影响。

(A) 南北走向长椭圆状异常

异常南北走向，反映磁性体走向为南北向，在垂直异常走向剖面内，有效磁化强度为垂直向下。图 3.4-1 是某矿区实测  $Z_a$  曲线，其特征是东侧下降较缓，西侧下降较快，并有负极值。考虑到垂直磁化特征，判定矿体东倾，东侧远处有负值，表明由矿体下端引起。

图 3.4-1 南北走向矿体、东西向剖面磁异常

此类异常特征与磁性体产状的关系可概括为：当  $Z_a$  正异常一侧下降缓慢，另一侧下降较快，并出现负极值，则磁性体倾向  $Z_a$  下降较缓的一侧，在此侧较远处若出现负异常则由磁性体下端所引起。当  $Z_a$  曲线对称时，则表明磁性体直立，若两侧无负值或负值不明显，则说明磁性体下延较大，反之若有负值存在，系下端延深较小所致。

#### (B) 东西走向长椭圆异常

在南北向剖面内，忽略剩磁，则其磁化方向即为当地地磁场方向。图 3.4-2 为河南某矿区磁异常，磁化倾角约为  $50^\circ$ ，其  $Z_a$  等值线呈东西走向，反映矿体为东西走向。由平面图的东西段异常看，正值范围很大，南侧下降缓慢，在很远时才出现负值，而北侧下降很快并出现较强的负值，判断磁化方向与倾向的夹角  $\gamma$  角较大，表明矿体南倾（可以定量计算  $\gamma$  角以便更确切地判断倾向）。

此类异常特征与磁性体，产状的关系可概括为：

① 若  $Z_a$  曲线近于对称（特别是正异常部分），说明磁性体向北倾斜，且倾角与地磁倾角相近，相当于顺层磁化。若北侧较远处出现负值，系矿体下端延深有限引起。② 若  $Z_a$  曲线北侧下降较快，有明显的负极值，南侧下降较缓，这是磁性体倾角大于磁化倾角的板状体异常特征。若北侧下降急剧，且负值与正值相比所占比例较大，则磁性体南倾，南侧远处如有负异常，则系由下端延深有限引起。反之如果北侧  $Z_a$  下降只比南侧略陡，则板体近于直立或略向北倾，此时最好计算其  $\gamma$  角，以便正确确定其倾向。

图 3.4-2 向南倾斜矿体上的  $Z_a$  异常图

1. 闪长岩；2. 浮土；3. 中奥陶纪灰岩；4. 矿体

#### (C) 任意走向的长椭圆状 $Z_a$ 异常

磁性体走向既不是东西又不是南北向时，在垂直异常走向的剖面内，有效磁化倾角应小于  $90^\circ$ ，但大于地磁倾角，其磁异常特征应界于上述南北走向与东西走向两种情况之间。图 3.4-3 是一个北东走向，倾向北西的矿体上的  $Z_a$  异常。

图 3.4-3 北东走向、北西倾斜矿体上的  $Z_a$  异常

#### B、根据 $T_a$ 异常特征判断倾向

利用矢量强度  $T_a (= \sqrt{Z_a^2 + H_a^2})$  判断磁性体倾向，将不受磁化方向的影响，无需已知磁化强度方向即可判断磁性体的倾向，在第三篇第一章中已进行了讨论。图 3.4-4 是山东某矿区的磁异常剖面，由  $Z_a$  换算  $H_a$  并合成  $T_a$ ，显然  $T_a$  北西侧曲线较缓，南东侧较陡，可见矿体倾向北西。

图 3.4-4 山东某矿体上的  $T_a$  曲线

### （三）磁异常的定量解释

定量解释通常是在定性解释基础上进行，但其结果常可补充初步解释的结果。定性和定量解释两者是相辅相成的，并无严格的分界。定量解释的目的在于：根据磁性地质体的几何参数和磁性参数的可能数值，结合地质规律，进一步判断场源的性质；提供磁性地质体或基底的几何参数（主要是埋深、倾角和厚度）在平面或沿剖面的变化关系，以便于推断地下的地质构造；提供磁性地质体在平面上的投影位置、埋深及倾向等，以便合理布置探矿工程，提高矿产勘探的经济效益。

定量解释方法的选择，应该选择那些简单、方便、精度高，适用范围广，有抗干扰能力，前提条件少，能自动检验或修正反演结果的方法。在定量解释工作中应注意下列问题。

#### 1. 根据工作目标任务合理选择定量解释方法

对于区域磁测资料，若以配合地质填图、研究区域构造、基底构造、圈定岩体和油气区盆地为目标的解释工作，则应选择能应用于大面积多体磁异常快速反演的方法。如磁性界面（包括居里面）反演方法、视磁化强度填图方法、拟 BP 反演方法、各种快速自动反演深度方法、欧拉法、总梯模法、沃纳法、切线法等。综合利用上列方法，再辅以合适的分场滤波方法即可获得深、浅层位的磁性构造、磁性层、磁性体的深度、轮廓以及空间展布规律。

对于勘探区磁测资料，若以查明磁性体的三维形态细节为目标，则应选择精细三维正反演方法。如三角形多面体、二度半组合体人机交互可视化正反演方法等。

对于航磁异常检查与小矿山磁测工作，由于一般只作少量剖面磁测属踏勘性剖面，可以采用简便的特征点法、切线法等估算磁性体深度。

#### 2. 根据地形、地理与地质特点合理选择处理转换与定量解释方法

对于区域磁测资料，如南北跨度大的测区、低纬度测区、地形起伏大的测区等，则应针对这些复杂情况，选用变磁倾角化极、低纬度化极以及曲面磁异常化极与曲面延拓、分量、导数转换的方法，对转换后的资料再作反演。也可直接选用在曲面地形上反演的方法，如已有曲面实测  $\Delta T$  及其  $\Delta T'_x$ 、 $\Delta T'_y$ 、 $\Delta T'_z$ ，则可直接在起伏地形下用欧拉法反演、复场强反演与球谐级数展开反演。若在弱地形下可用拟 BP 法反演。

对于勘探区磁测资料，若地形起伏、地质体磁性分块均匀，且有多体，则仍可用三角形、多面体与二度半组合体人机交互可视化正反演方法进行定量解释。

在作处理转换时特别应结合测区的地质情况选择合适的延拓高度与有效的滤波方法，避免盲目使用处理转换方法，增加不必要的图件与工作量。

#### 3. 平面与剖面相结合，合理组合使用反演方法

在进行区域磁测资料解释时，一方面再好选择能控制全区的少量典型剖面作三维精细反演，可采用人机交互可视化正反演方法。在此基础上给出全区磁性界面反演的定解条件，以此来控制全区界面反演的效果。另一方面可先进行宽约束条件下的拟 BP 反演，反演出浅、中、深不同层位的磁化强度分布，进而给出区内磁性体展布的大致轮廓，以此作为初始模型，提供精细三维反演作进一步反演。这样把不同特点的反演方法有机结合，可以提高反演的效果。

### （四）地质结论和地质成果图示

地质结论是磁异常地质解释的成果，也是磁测工作的最终成果，它是磁场所反映的全部地质情况的归结，是由定性、定量解释与地质规律结合所得出的地质推论。它不一定与地质人员的地质推论相同。

地质图示是磁测工作地质成果的集中表现。因此，磁测成果应尽可能以推断成果图的形

式反映出来,如推断地质剖面图、推断地质略图、推断矿产预测略图等。这些图件不仅便于地质单位使用,也便于根据验证结果和新的地质成果进行再推断。

根据不同的任务,要求有不同的成果图。现举有代表性的航磁测量成果图介绍于后。若是区域性航磁或油气航磁测量其成果图一般分三类

### 1. 航磁测量基础图件

① 航磁测量剖面图;② 航磁测量等值线平面图;③ 航磁测量测网分布图;④ 航磁测量飞行高度图。

### 2. 航磁测量数据换算图

① 磁性体最小深度图;② 其它数据换算图件(选择效果好、作用大的图件)。

### 3. 航磁测量解释图件

① 推断基底深度图;② 推断基底岩相分布图;③ 推断区域地质构造图;④ 局部构造异常及油气远景预测图;⑤ 根据具体地质任务和条件编制的其它解释图件。

## 第二节 卫星磁测在地壳磁结构研究中的应用

根据围绕地球的磁卫星观测数据作出的磁异常图,对研究地壳及上地幔的区域性岩石变化,地壳厚度及地热扰动等问题有重要意义。由于磁卫星飞行的平均高度约 400km,在这样大距离下,所能反应的是地壳各处垂向磁化强度与各处地壳厚度乘积所形成的磁矩强度的分布,也相当于反映的是磁性层厚度与磁化率的乘积,也有人把其称为“积成磁化率”。据此,若设地壳厚度为一定值,则可求出地壳的磁化强度或磁化率分布,相当于厚度固定的等效层的磁性分布。若设等效层磁性为一定值,则可求出地壳厚度变化。在卫星磁测资料的解释中,目前一般反演“积成磁化率”。由于卫星磁测工作开展较少,卫星磁异常的定量解释与地质分析尚处于起步阶段,需要进一步研究。下面介绍一些有代表性的工作。

### 一、磁卫星用于陆海区地壳磁性特征研究

美国 1982 年从 MAGSAT 磁卫星测量数据经改正处理后得到了标量磁异常  $\Delta T$  图(3.4-5)。该图是地球  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  网格的  $\Delta T$  图,其范围为  $50^{\circ}S - 72^{\circ}N$ ,  $140^{\circ}W - 62^{\circ}E$ 。一般认为地壳中存在长波长磁异常的磁源是深源,位于下地壳内。但在海洋区,由于地壳很薄,只有几公里,故磁异常源也可能位于地幔中,那里有富含铁磁性的物质。由于洋壳中海洋沉积物的低热导率,洋壳的温度梯度值并不高,因此居里面可能在莫霍面之下,而使上地幔的顶层具有铁磁性。陆壳中的磁性物质与侵入岩浆活动,地球化学作用及构造变化特征等有密切关系。陆壳一般有数十公里厚,根据地下温度变化情况,居里面可能在莫霍面之上或与之相当,也可能在莫霍面之下。洋壳与陆壳的区域岩石学、地球化学及地热活动等都有各自的特点,利用卫星磁异常作出全球磁壳磁性特征图,对了解地壳主要单元的性质及其演化是很有意义。为了研究磁壳磁性特征,可以将图 3.4-5 的  $\Delta T$  经化磁极转换后的 MAGSAT 化磁极异常换算出“积成磁化率”。换算时设陆壳厚度为 40km,洋壳厚度为 6km,求出地球  $4^{\circ} \times 4^{\circ}$  壳块的积成磁化率分布图[21]。经分析洋壳和陆壳的区域磁化强度模型后发现,洋壳与陆壳具有很不相同的磁化强度特征。实际观测到的洋底岩石标本的平均磁化强度(在 6km 厚洋壳内)值为  $(0.7-1.5) A/M$ 。根据卫星磁异常得出的洋壳磁化强度接近其上限,此上限应属下地壳上地幔的蛇纹石化区,具有与地磁场方向相一致的粘滞剩磁。在大西洋和东太平洋的磁化率也都接近于“积成磁化率”的上限。这支持了在接近洋壳底部可能有粘滞剩磁物质存在的观点。在卫星高度上的大陆及海洋区的磁异常主要反映感磁和粘滞剩磁,洋壳的条带磁异常在

卫星高度已显示不出来了。

图 3.4-5 MAGSAT (2°) 标量磁异常  $\Delta T$  图  
(等值线间隔为 2nT; 数据的近似高度为 400km)

## 二、中国磁卫星异常反映的地壳磁结构特征

图 3.4-6 是中国大陆上空 400km 高度由 MAGSAT 磁卫星测得的标量磁异常图。可见，西藏有明显的负异常，东南沿海区也是负异常分布区。新疆、华北、东北和华南为正异常区。此图反映了宏观特征，在一定程度上反映了地壳物质结构的差异。西藏负异常，可能与喜马拉雅山下地壳加厚的起因有关。推测其主要起因于地壳弱磁的减小和逆掩断层，在这些山系之下的高磁下地壳已经下沉到高温上地幔，厚的上地壳已产生的热覆盖了下地壳，并且增加了下地壳热流。结果，从热的上地壳扩散到下地壳的热量提高了下地壳的温度，热减退了一部份地壳磁性。从而导致总磁化率减小与喜马拉雅山的低磁性。

图 3.4-6 中国大陆上空卫星磁异常图  
(等值线间隔为 2nT)

若把卫星磁异常换算为积成磁化率，则可以更好的显示出和中国区域大地构造特点的相关性[21]。前寒武地台为高磁区，而山系、缝合带、大陆较大规模的磁异常可能产生于下地壳磁化强度的横向变化。沿着主要山系的上地壳加厚部分把下地壳压进高温上地幔，且导致热退磁。同样在高热流区，居里等温线上移，使部分下地壳被热致退磁。

近期，我国学者曾把中国大陆卫星磁异常图与航磁异常反演的磁性层顶面深度、底面深度（相当于居里面深度）加以综合分析研究，对中国境内的岩石圈磁性结构提出一些有意义的见解：① 在塔里木、四川和松辽盆地，地壳呈强磁性，至少可以分为两层，上层磁化强度为 1A/m，下层为 2A/m 或更强一些，上述盆地中央、地幔顶部约 10km 厚，也是强磁性的。② 青藏高原，中国东南沿海一带以及其它一些褶皱带之下，地壳是弱磁性的，磁性层在地表以下 30km 内，磁化强度约为 0.66A/m。③ 地壳的磁性与地质构造关系密切，稳定的地台、隆块、地壳磁性强，造山带磁性弱。这些探索性的结果，对进一步深化研究有一定意义。

## 第三节 磁测在区域和深部地质地球物理调查中的应用

区域地质测量（又称区域地质调查）是一项具有战略意义的、综合性的基础地质工作，是地质工作的先行步骤。磁测是地质调查和找矿时的综合物探方法中的一种手段。因区测比例尺的不同，对磁测任务的要求也不同。

### 一、区域地质测量的基本目的和对磁测的要求

区域地质测量的常用比例尺由小到大分别为：1:100 万（50 万），1:20 万（10 万）和 1:5



万。目前,我国各种比例尺的航空磁测已覆盖了大约 950 万 $\text{km}^2$ 的国土面积,其中包括海上 120 万 $\text{km}^2$ 。现已编制的不同比例尺的航磁图件,为满足区域地质调查研究起到了一定作用。

国内、外大面积航空磁测的经验表明,大面积航空磁测对大地构造研究特别是对划分构造单元和控制内生矿床生成的深大断裂的分辨和圈定有特殊作用。1957 年提出的郯城—庐江大断裂带,已经逐渐被地质界普遍接受,经过深化研究已成为我国东部地质构造和矿床生成控制的重要因素。

### **(一) 1:100 万的区域地质调查**

小比例尺的区域地质调查工作,主要在地质研究程度较低的地区进行。与此相应的磁测是同比例尺的航空磁测,其主要任务是研究大地构造,进行大地构造分区;研究与地壳运动密切相关的巨大断裂;获取区域地质矿产的初步资料,研究燃料和金属矿产总的分布规律,其中主要是燃料矿产。小比例尺磁场图能清晰反映地台区、地槽区、洋底、结晶基底的深拗陷区或其出露区的磁场特征,可以用来推断测区的大区域地质构造。如 1973~1978 年完成的北黄海、南黄海、东海和南海北部的 1:100 万~1:50 万航空磁测概查(线距 10~5km),对我国近海海域的地质构造研究和含油气远景评价起了先行作用。2000 年 11 月完成的青藏高原中西部航磁 1:100 万概查,填补了我国陆地最大一片航磁空白,对青藏高原基底和缝合带性质、断裂构造格架、构造单元划分等。重大地质问题以及成矿地质条件等获得了有重要价值的新成果,圈出了 21 个找矿远景区与 11 个沉积盆地[82]。

在异常的解釋推断中,应进行磁场分区,即根据异常的分布变化特点(平静的、变化的、强烈变化的和杂乱的)、异常的符号(升高的正磁场区、降低的负磁场区和接近零值的磁场区)、以及异常的走向及其排列组合特点(如平行线束、雁行束、放射状束和 X 型交叉束等)划分出不同的磁场区,每一磁场区都有各自的特点,它们对应着一定的地质构造单元。将地质图与磁场图对比时,既可见到二者的共同处,又能发现它们之间的差别。因为即使不存在深部场源时,也只有在产状很陡的情况下,经化极处理后的磁异常轮廓才与浅部磁性体的外形一致。

### **(二) 1:20 万区域地质调查**

在中比例尺区域地质调查中,航磁工作的任务应以地质填图,研究构造和划分成矿带为重点。例如,根据磁异常圈定侵入岩、喷出岩以及沉积岩和变质岩,确定接触带,断裂带、破碎带,编制基岩地质图和基底构造岩相等。进而根据控矿因素与局部异常的关系,划分出成矿远景区。

一般在中比例尺地质测量工作开始前,应先进行同比例尺或更大比例尺的航空磁测,以发挥其覆盖均匀,能发现隐伏地质现象的特点。正确利用目前已编制出版的不同比例尺的航磁基础图件资料,对一些省区的区域地质构造和成矿规律研究,将能起到重要作用。

### **(三) 1:5 万的区域地质调查**

大比例尺的区域地质调查,一般只在有区域成矿远景的地区进行,主要是深入研究区域成矿规律,预测各类矿床的分布。相应的磁测工作除了配合地质进行地质填图外,还应具有明显的直接或间接找矿性质,要求对每个异常进行较详细的研究。

应该指出,为了突出某种地质因素的异常信息,不论对新资料还是老资料,常需进行场的转换和处理。

## **二、根据磁异常划分不同岩性区和圈定岩体**

由于磁异常是由不同地质体间的磁性差异引起的,所以某种地质体的异常特征,与地质体的空间分布、形状、产状及磁性直接相关。理论和实践表明:①磁异常的位置和轮廓可以

大致反映地质体的位置和轮廓；②磁异常的轴向，一般能反映地质体的走向；③在地质体出露和埋深较小的情况下，其磁不均匀性常会使异常发生起伏变化；④磁异常的强度和分布范围会随埋深而变化。除以上几点外，在圈定岩体和划分岩性区时，还应注意不同岩石的地质分布特点，岩石磁性的变化规律及其相应的磁场特点，磁性体的磁化特点等。下面给出不同岩类磁场特征及视磁强度填图划分岩性分区的实例。

### （一）各种岩类磁异常的一般特征

#### 1. 基性超基性岩体的磁场特征

基性与超基性侵入岩，一般含有较多的铁磁性矿物。在出露或埋藏较浅时，在地面可引起数千 nT 的强磁异常。由于磁性矿物含量的不均匀，曲线有一定程度的跳跃（图 3.4-7）。有时岩体中含有百分之几到百分之十几的磁铁矿，此时岩体磁异常与磁铁矿体磁异常往往难以区分。

图 3.4-7 基性超基性岩磁异常图

1.—碳酸岩化超基性岩；2.—辉橄岩；3.—橄橄岩；4.—花岗岩；5.—闪长岩

在有的基性与超基性岩体的不同岩相带上，因所含磁性矿物的数量和结构不同，磁异常强度往往有明显区别。如内蒙某超基性岩体中，单斜辉石橄榄岩含磁铁矿达 8-18%，磁性最强；斜长方辉石橄榄岩及纯橄榄岩含磁铁矿约 5-8%，磁性次强；辉长岩含磁铁矿很少，磁性很弱。因此，利用磁测结果可划分此三种岩相带。

#### 2. 基性火山岩——玄武岩等的磁场特征

已知玄武岩体上的磁异常值变化很大，有数百 nT 以下的弱异常，也有数千 nT 的强异常，以上千 nT 的异常较为常见。这些异常常具有锯齿状剧烈跳跃的特点，与其它岩体有明显的区别。图 3.4-8 为某玄武岩体上的  $\Delta T$  异常，图 3.4-9 为几个基性火山岩上的  $Z_a$  异常。

图 3.4-8 玄武岩体上的  $\Delta T$  异常

图 3.4-9 基性火山岩的  $Z_a$  异常

1.—片岩；2.—基性次火山岩；3.—第四系；  
4.—基性火山岩；5.—率武玢岩；6.—玄武岩

#### 3. 中性火成岩——闪长岩的磁场特征

闪长岩常具有中等强度的磁性，在出露岩体上可以引起 1000~3000nT。当磁性不均匀时，异常曲线在一定背景上有不同程度的跳跃变化（图 3.4-10）；当磁性均匀时，曲线跳跃幅度较小（图 3.4-11）。

图 3.4-10 磁性不均匀闪长岩  $Z_a$  异常

图 3.4-11 磁性均匀闪长岩  $Z_a$  异常

个别情况下，由于闪长岩含磁性矿物较多而引起数千 nT 的异常与磁铁矿床异常难于区分。另外，也有一定数量的闪长岩体磁性很弱，无明显异常。

#### 4. 中性火山岩——安山岩等的磁场特征

在出露安山岩体上的磁异常,强者可达数千 nT,弱者百 nT 以下,一般多在数百至 2000nT 左右。异常曲线往往起伏较大,跳跃频繁,但与玄武岩相比,正、负异常急剧交替的情况较少,并且岩体中弱异常所占比重相对较多。

#### 5. 酸性火成岩——花岗岩等的磁场特征

花岗岩类一般磁性较弱,在多数出露岩体上只有数百 nT 左右的磁异常,有时甚至在百 nT 以下,曲线起伏跳跃较小,少数岩体上也有形成数千 nT 异常的。花岗岩体有时有不同的岩相带,常形成不同的磁场特征,且边缘相的磁场强度往往相对较高。花岗闪长岩的磁异常常较花岗岩为高,而与闪长岩相近。

#### 6. 酸性火山岩——流纹岩等的磁场特征

这类岩石的磁性一般较弱,磁场平静。但也有个别磁性很强能引起数千 nT 的异常。

#### 7. 沉积岩类的磁场特征

沉积岩多数只有微弱的磁性,故磁场平静、单调。有些砂岩、页岩或含有磁铁矿的大理岩,因含有少量磁铁矿物而出现磁异常。有的盐丘,因其组成矿物具有反磁性而有数十纳特的负磁异常。

#### 8. 变质岩类的磁场特征

沉积岩形成的变质岩一般磁性微弱,磁场平静。由火成岩形成的变质岩异常与中酸性岩体异常相近。含铁石英岩情况特殊,往往形成有明显走向的强磁异常。

综上所述,图 3.4-12 给出了通过几种岩体和岩层时剖面的  $Z_a$  曲线。

图 3.4-12 通过几种岩体和岩层的  $Z_a$  剖面异常曲线

1.一辉长岩; 2.一黑云母细粒花岗岩; 3.一花岗岩; 4.一玢岩;  
5.一玄武岩墙; 6.一砂岩; 7.一灰岩页岩层; 8.一超基性岩; 9.一破碎带

### (二) 配合岩性分区与圈定岩体的视磁化强度填图

以秦巴地区航磁资料的视磁化率和视磁化强度填图为例说明磁测资料在配合区域地质填图方面的应用。

秦巴地区广泛存在火山岩、岩浆岩和前震旦纪变质岩,他们大都具有一定磁性,从而为视磁化强度填图提供了必要的物理前提,对秦巴地区航磁资料采用正则化滤波方法提取深、浅磁源磁场,对浅部场采用频率域磁性界面,反演视磁化强度方法并换算成视磁化率,示于图 3.4-13。图中把视磁化率按大小划分为四个级次,据此与地质对比可以划分出不同岩类的分布,特别在覆盖区推断出隐伏岩体的分布范围及深部延展特征。

图 3.4-13 秦巴地区航磁异常的浅层视磁化率填图

1.一较强磁性 ( $>4\pi \cdot 3000 \times 10^{-6}\text{SI}$ ); 2.一中等磁性 [ $4\pi (2000-3000) \times 10^{-6}\text{SI}$ ];  
3.一较弱磁性 [ $4\pi (1000-2000) \times 10^{-6}\text{SI}$ ]; 4.一弱磁性 [ $<4\pi \cdot 1000 \times 10^{-6}\text{SI}$ ]; 5.一分区界线

对深部场采用频率域磁性层模型作深层视磁化强度填图,见图 3.4-14。该图展示了深部

地质体的磁性特征，秦岭造山带深部磁性较南北两侧低，形成明显的分界线，可划分为华北地台、扬子地台和秦岭造山带三大构造区，这些分界线反映了大于 6km 的深度界线，与地表界线不一定一致。

图 3.4-14 秦巴地区深层视磁化强度等值线

(单位  $10^{-2}A/m$ )

由图 3.4-14 进一步可见，华北地台与扬子地台深部具有类似的磁性特征，都是较高磁性块体，而且明显地位于同一北东向展布线上，中间被东西向秦岭造山带所隔开。由此推断：华北地台、扬子地台在形成秦岭造山带以前可能为统一的构造单元，后经复杂的开合运动形成独特的秦岭造山带。

由图 3.4-13 还可推断其构造格局，秦岭造山带及其北侧反映的火山岩及岩体呈 Y 形分布，在中间地带有规律地分布了平行排列的东西向火山岩及岩浆岩带 7-8 条，且分别被北东、近南北和北西向构造所分割成断续分布的块体。在东侧还可显出以风陵渡东为起点向南东展开的放状构造。这些构造的交会部位可能对研究与岩浆活动有关的内生矿床的分布规律及深部成矿预测有一定意义。

### (三) 磁测在火山机构及金伯利岩筒填图中的应用

目前，大家公认用磁测圈定火山口及金伯利岩筒效果很好。用磁测找火山口时，总结出应注意如下问题：①同一地区火山口可能有多种形式，如既有中心式的，又有裂隙式的。因此火山口上的磁异常既有等轴状，又有条带状。②火山口上的磁异常有时以负磁异常为主，这是因为火山口中的火山岩以剩余磁性为主，且其方向反转。③在火山机构上，磁异常有呈环状及放射状，这是因为火山口附近的环状和放射状地质构造对磁性物质的分布影响所致。④对于许多古火山口，或者因上覆地层具磁性，或者因火山口中充填的岩石无磁性（或有磁性但后来因热液作用而失去磁性），其上无明显的磁异常。图 3.4-15 为一个典型火山口上的  $\Delta T$  磁异常图，具有斜磁化等轴状  $\Delta T$  异常的特征。

图 3.4-15 一个火山口的  $\Delta T$  磁异常图

金刚石是一种非常主要的非金属矿产。金伯利岩又称角砾母橄榄岩，是偏碱性的浅成到超浅成相的超基性岩。金刚石的原生矿床主要赋存于金伯利岩筒中。金伯利岩有的具有磁性，有的不具磁性。例如俄罗斯雅库梯地区，已知的金伯利岩筒 38% 其磁化率为  $(3140-12570) \times 10^{-6}SI$ ，23% 为弱磁性或无磁性。因此大部分岩筒上有磁异常（图 3.4-16）。

图 3.4-16 2 个金伯利岩筒上  $Z_a$  异常平面图

磁异常：1.—正值；2.—负值；3.—零值；

4.—金伯利岩筒；5.—含矿碎屑金伯利岩；6.—金伯利岩脉

### 三、根据磁异常推断断裂、破碎带及褶皱

用磁法能圈定断裂带、破碎带，是因为断裂的产生或者改变了岩石的磁性，或者改变了地层的产状，或者沿断裂带伴有后期或同期岩浆活动，或者沿断裂两侧具有不同的构造特点。断裂或断裂带上的磁异常，按其特征可分为以下几种：

#### （一）断裂的磁异常特征

沿断裂有磁性岩脉（岩体）充填，这时沿断裂方向会有高值带状异常（或线型异常带）分布；若沿断裂方向因岩浆活动不均匀，可能产生断续的串珠状异常；有些断裂破碎带范围较大，构造应力比较复杂，既有垂直变位也有水平变位和扭转现象，在这种情况下会造成雁行排列的岩浆活动通道，因此，在这类构造上就会出现雁行状异常带。

在断块活动比较复杂的地区，可见到放射状异常带组，每一个线性异常，都标志一条断裂岩浆活动线。

当我们根据磁异常推断断裂构造时，一要注意标出异常轴，二是要有理由肯定异常与岩浆活动有关。另一种情况是，磁性岩石断裂，无岩浆活动伴随，但当其断裂破碎现象显著时，因磁性变化，会出现低值或负的异常带，这就是所谓的“干断裂”异常。

#### （二）深大断裂的磁异常特征

深大断裂是一种特殊的断裂类型。这种断裂常是两个不同大地构造单元的分界线；断裂切割地球的硅铝层，甚至更深；断裂活动和岩浆活动具有多轮回性，它多半是现代地震的活动带。它是一个宽度可达几十公里，长几百公里的复杂断裂束，是一个宽大的岩浆剧裂活动通道。

图 3.4-17 郯城——庐江深大断裂中部磁异常图

在深大断裂带内，近乎平行的断裂线成组出现，磁异常也是如此。图 3.4-17 是郯城—庐江深大断裂的磁场图，该断裂长约 800km，宽 30~50km，其磁异常以正异常形式出现。

深大断裂带常可能是一个巨大的金属成矿带，如长江中、下游深大断裂带就是一个金属矿成矿带。

图 3.4-18 和图 3.4-19 分别为“干断裂”和断裂上的磁异常图

图 3.4-18 “干断裂”上的航磁异常图

图 3.4-19 断裂上的磁异常图

#### （三）断层的磁异常特征

断层也是一种断裂构造，规模较大的断层，沿断层面两盘发生了明显的相对位移。一个磁性层或磁性体当其断层错开时，不论是上下错动还是水平错动，当断距较大时，都会使磁异常发生明显变化。一般上盘的磁异常强度小，而范围小，下盘的磁异常反映为缓、宽、弱和较平稳；若为水平错动，磁异常等值线会发生扭曲，异常轴向发生明显变化。

#### （四）褶皱构造的磁异常

在某些油气盆地，在沉积地层中常存在的磁性标志层，岩石受力发生弯曲，磁性层也随之褶皱，而形成背斜和向斜。一般背斜轴部上方会出现高值正异常，而在向斜两翼上方为升高的正异常，而在向斜轴部为相对低的平缓异常。当背斜轴部被剥蚀掉时，其异常类似于两个相隔一定距离，倾斜方向不同的板状体异常迭加。

采用高精度航磁进行油气勘查，常常观测到区域磁异常背景上数纳特的高部磁异常，它们可能为基底构造小范围突起。图 3.4-20 所示在强度接近百纳特的区域异常极大值带上迭加局部正异常（3~4nT），反映局部隆起。该局部隆起构造位于大型堤状隆起的顶部。

图 3.4-20 堤状隆起顶部  $\Delta T$  磁异常

1.—构造轮廓；2.—磁场等值线（以 nT 为单位）

实际情况存在多种可能，图 3.4-21，所示局部构造位于堤状隆起构造的侧翼部，致使局部异常把区域异常翼部形态复杂化，造成等值线明显“膨胀”。迭加异常幅度仅 6~8nT，由此可见，隆起构造问题，只有通过高精度磁测才能解决。

图 3.4-21 堤状隆起侧翼上的  $\Delta T$  磁异常

1.—构造轮廓；2.—磁场等值线

在金属矿区磁测时，常常发现高值磁异常带呈现 U 字或 V 字型的平面等值线特征，即呈喇叭状，一端撒开，一端收敛，此为向斜状矿床的特征。在高值异常带所包围的范围内为宽缓的正值或不太强的负值。高值异常带周围为低值等值线所封闭。高值异常带的收敛端即向斜的封闭端之北侧常有强烈的拌生负值异常。图 3.4-22 即为此类磁异常的一个实例。

图 3.4-22 一个半封闭型向斜状矿床上的  $Z_a$  异常

a.—平面等值线图；b.—剖面图

对于连续褶皱形成的两个或两个以上的封闭、半封闭、斜歪向斜迭加形成的复杂形态矿床，其平面异常呈“S”形，剖面异常呈“W”，见[88]。

#### 四、区域磁测资料在研究深部地质构造方面的应用

已有系列方法利用区域磁测资料对区域构造（构造分区、构造格架、基底降凹分布断裂、分布等）磁性岩体分布、岩层填图等作出解释推断，并给出相应的推断图，这方面有许多成功的例子可供借鉴，这里重点介绍利用航磁资料反演磁性界面研究华北地区古陆核的例子。

利用原地质矿产部航测总队出版的百万分之一（中国东部航空磁力异常  $\Delta T$  图）我们计算了 102° 以东、北纬 20° 以北的整个中国东部地区的磁性界面图。在计算时采用正则化滤波，滤除了范围小于 50km 的异常，对范围较大的磁异常进行了磁性界面的反演[20]，得到深层磁性界面深度图，这里给出泛华北地区的结果，示于图 3.4-23。该图反映了泛华北地区深部磁性块体隆、坳变化特征。由图可见，图中醒目地分布了六个隆起区：遵化—秦皇岛北

东向隆起区；济南—郯城隆起区；太原—临汾隆起区；东胜—呼和浩特隆起区；赤峰隆起区；辽东隆起区。后三个隆起区呈有规律的北东方向展布。在六个隆起区之间广泛分布有北北东、北东东、北东和北西向的凹陷带。地质学家（白瑾等，1996）根据太古宙的构造样式以及我们提供的深层磁性界面等深线资料，见图 3.4-23，将华北地区划分为 6 个陆核，分别命名为：东胜、赤峰、辽吉、临汾、渤海和济宁陆核。每个陆核的中部都与深层磁性界面的隆起区（10~18km）相对应，深层磁性界面的凹陷区（深度为 16~24km），则成为陆核的边缘带，即碰撞带。太古宙麻粒岩一片麻岩区分布在陆核（深层磁性界面的隆起区）的中部，而太古宙绿岩带都分布在各个陆核的周边。可以看出，磁性界面的隆凹为华北地区陆核的存在与分布提供了重要的地球物理证据[81]。

图 3.4-23 中朝板块华北地区太古宙陆核分布与深层磁性界面等深度图

（据白瑾等，1996；深层磁性界面深度资料据管志宁等，1987）

## 五、成矿区的圈定和划分

成矿区的圈定和划分，是一项地质、地球物理资料相结合而进行的一种综合性研究工作。利用磁测资料时，主要应考虑两方面的条件，一是成矿和控矿条件，二是矿与围岩的磁性差异，即要综合考虑地质和地球物理的可能性。

### （一）含油气远景区的圈定和划分

根据磁测资料评价含油气远景时，首先要考虑磁性界面深度图，即基底深度图所反映的构造形态（基岩的相对隆起与凹陷），同时也要研究生油条件、储油条件、构造条件等，其中主要是构造条件。一般来说，只要有比较宽阔的深凹陷存在，就有形成油气藏的可能性，只要在深凹陷内存在着相对隆起，一般应划分为成油气有利地段。

以构造条件为主导的远景评价方法，曾在各个工业油气藏盆地中利用过，一般都是很成功的。如在松辽盆地划分出的大庆长垣，以及在渤海地区，在江汉地区都得到了肯定的效果。

### （二）金属成矿区的圈定

在评价金属矿成矿远景区时，要研究岩浆控制条件，构造控制条件、地层和岩性控制条件、地球化学条件和地貌条件等。其中主要是岩浆、构造和地层控制条件，而区域地质构造是控制全局的因素。我们知道，与超基性岩密切有关的矿床有铬、铂和金刚石；与基性岩共生的矿床有钛磁铁矿和硫化镍矿；与中酸性火成岩有关的矿床，如钨、锡、钼、铜、铅、锌、金、铀、钛、锂、铍、铌、钽等各种成因类型的绝大多数内生矿床。区域性地质构造控制着成矿区、成矿带、矿田和矿床的位置。断裂带是岩浆活动的通道，在断裂交叉处往往控制着成矿远景区。在评价内生矿床时，岩浆和构造条件是主要的。而在评价海相沉积矿床时，地层及构造则是主要的，锰矿、铀矿、铜矿、铝土矿等沉积型矿床都受地层控制。

根据磁测资料可以圈定侵入体，研究侵入体的形状、产状、岩相和蚀变带等；可以确定断裂和褶皱构造、划分不同岩性区。利用磁测资料对控矿因素的分析结果，再结合地质资料和区内的矿点、矿化点、矿化带、矿床等各种找矿标志（包括各种物化探异常在内）进行综合研究，圈定出成矿远景区。

## 第四节 磁测在石油、天然气勘查中的应用

磁法是以测量磁场的微小变化为基础的。磁性岩石的分布发生任何变化都会引起磁场的相应变化。大多数沉积岩几乎都是无磁性的，而下伏火成岩和基岩通常是弱磁性的。根据磁测资料确定了基岩的深度，也就确定了沉积物的厚度。如确定了基岩的起伏，因基底面起伏能在上覆沉积岩中产生有利于油气聚集的构造起伏，因而能为油气勘查提供有用资料。

很长一段时间，不同比例尺（主要是 1:50 万、1:20 万）的磁测在石油物探中的作用，主要限于圈定沉积盆地、研究区域地质构造特征和根据二级构造异常确定油气远景区等方面。随着高精度航空磁测工作的开展，构造航磁不仅在查明区域地质构造方面，就是在寻找局部沉积构造和油气田方面也能起到重要作用。许多航磁局部异常已被后来的勘探工作证实为工业油气田，一些已被开发的油田上也有磁异常反映。航磁发现的不少局部异常为进一步布置地震勘探工作提供了重要依据。目前，磁测在油气构造普查中的作用，至少表现在以下几个方面：

- ① 能以相对少的投资，在较短时间内提供大面积反映区域与局部构造信息的磁场资料；
- ② 可以比较详细地确定进一步投入比较昂贵的物探方法的工作地段；
- ③ 预测油气远景构造。

### 一、磁测在勘查油气盆地地质构造方面的应用

图 3.4-24 是由低磁场背景上局部升高异常所反映的 TAD 长垣，磁性体位于 3~5km 深处，长垣为中生界沉积构造，在轴部钻井，于井深 4188m 见上侏罗系有磁性的安山岩及玄武岩，其厚度达 104m。

图 3.4-24 TAD 长垣在磁场上的反映

1.— $\Delta T$  剖面；2.—航磁圈定的构造；3.—地震构造；

a.—剖面平面图；b.— $\Delta T$  剖面

图 3.4-25 所示异常是一个典型的基岩块断异常。图中异常呈一向北西向突出的弧形异常，东南侧正异常强度达 50~250nT，北西侧负异常的强度为-150nT。对应的重力高位于正负磁异常之间的梯度带上，异常值达 20mgal。该凸起的主要断裂在这些弧形异常范围内，已被证实为高产油藏。图 3.4-26 为该凸起的横剖面图。

图 3.4-25 TGZ 凸起在重磁场上的反映

图 3.4-26 TGZ 凸起横剖面

当沉积盖层中存在一定厚度的磁性沉积层时，盖层褶皱构造就能引起与其相应的磁异常。磁性岩层多为含有少量磁铁矿的陆源岩层，如砂岩之类。如四川盆地地下三迭系飞仙关组、侏罗系上沙溪庙组等为磁性层。其岩性多为砂岩、页岩。除四川盆地外，塔里木、柴达木盆地也都有磁性地层组成的背、向斜构造。

图 3.4-27 是四川盆地飞仙关磁性层背斜上的磁异常图和地质图，由图可知，二者对应很好。



图 3.4-27 DDZ 背斜磁异常图

a. —地质图；b. — $\Delta T$  剩余磁异常图

由以上所述可知，磁测不仅能解决油气盆地内有关磁性基底的起伏、断裂、岩性等区域地质问题，还可通过对  $\Delta T$  局部异常的提取和研究，圈定盖层中的局部构造。

另外，近年有人提出在油田上空发现存在高波数（高频）磁异常。认为这种异常反映近地表的磁铁矿，而磁铁矿是由氢氧化铁、氧化物或赤铁矿的还原形成。这种磁铁矿的形成被认为是石油渗出的直接结果，因而利用这种异常可以判定油气藏的存在。还有人认为油气藏上方碳氢化合物形成还原柱，由氧化还原电位产生的自然电流产生磁异常进而找油的设想。现简要介绍于下。

## 二、油气藏标志的磁力检测

### （一）“磁电勘探”找油

美国皮尔逊 70 年代提出“磁电勘探”理论，认为油气藏上方由于碳氢化合物的上逸形成了原原柱、柱内外氧化还原电位的变化导致了沉积岩中岩石极化，产生自然电流，皮尔逊称这种电流引起的磁异常为磁电效应。并提出了采用磁电滤波器提取与油气藏有关的磁异常信息[83]。一些学者对此研究并提出了问题：①与油气藏有关的这种地电流存在与否、分布情况、强度大小及其起因不清，需研究证实；②皮尔逊用柱状电流等效于整个电流分布计算磁电效应不合适，因而据此提出的用计算磁场环流的方法提取地电流效应的观点不正确。从位场理论出发可知地下电流总是自行闭合，它在地面及空中引起的磁场只能是一个环流为零的位场。而需要考虑的是该用什么模型来正确计算地电流的磁效应。皮尔逊提出的磁电滤波器实质是一种带有方向滤波特性的近似高通滤波器，仅是一种提取局部异常的方法[5]。

### （二）油气藏上方磁性矿物的磁异常

美国学者在俄克拉荷马州的赛曼特（Cement）油田的航空磁测中发现了高波数的磁异常，解释为由烃类的微渗作用在还原环境中近地表的氧化铁或者赤铁矿还原成的磁铁矿所造成的。

图 3.4-28 为赛曼特油田上部分航磁剖面，图 3.4-29 为油田五口井的磁铁矿重量百分比与井深的关系图，在 100-300 米深度内磁铁矿含量有升高的部位。推测其与高频磁异常有关。

图 3.4-28 赛曼特油田航磁平面剖面图

图 3.4-29 赛曼特油田五口井磁铁矿重量百分比图

油气田上方产生弱小磁异常的原因，已有含油岩石的氧化变质作用和化学与微生物（细菌）成岩过程等两类解释，前一类解释是：油气圈闭一般存在漏隙，石油或天然气可以通过喷发溢出、溶解溢出与扩散逸出等三种途径从储层中逸出。从压力较高的储层中，透过半渗透性的沉积柱垂直地扩散到地表。碳氢化合物与其相关的化合物（ $H_2S$ ），从油气储层中缓

慢泄露,经过漫长时期后,在其覆盖层中可以形成氧化还原环境,在周围介质中,形成了氧化还原条件。溶解在水中的碳氢化合物被向上运移,基本上被氧化消耗了分子氧,从而在圈闭上方形成很强的还原环境,使得矿物中的铁活化还原成亚铁( $\text{Fe}^{2+}$ )态,亚铁离子沉淀下来,形成磁铁矿或黄铁矿。磁铁矿可以在潜水面附近沉积下来,究竟在近代潜水面的上部或下部还与过去地质时代潜水面的水平有关[85]。后一类解释是:基于热力学观点可以推测成岩环境,磁性矿物形成和消失的化学条件,研究发现在一定热力平衡的化学条件下许多细菌能够生成磁性矿物。在受烃类渗漏影响的环境中,达到热力平衡的化学条件时,细菌和化学作用往往能产生磁铁矿或磁黄铁矿而破坏赤铁矿,从而产生磁性差异,引起可以观测到的磁异常[21]。以上解释都是假设近表磁性变化是与烃类从深部往上渗出有关,故有人建议进行土壤磁化率测量、磁性多参数测量与微磁测量并与烃类壤中气研究相结合,进行综合分析研究[84]。

国外学者把海洋油气渗漏烃蚀变带的磁异常从观测数据中消除其它影响因素(如基底到海底这一区间的磁性异常干扰)提取出来,由于这种异常等值线呈近似圆形称为“磁亮点”。研究认为“磁亮点”可以成为与油气相关性的一种标志。据此,中国科学院地质与地球物理研究所对中国海区的典型海域进行“磁亮点”处理和分析,检测海底烃蚀变带的存在,进而为寻找海底油气藏的分布远景区取得了有意义的成果[86]。

## 第五节 磁测在固体矿产勘查中的应用

磁测在固体矿产勘查中的作用主要是直接找矿和间接找矿两方面。

磁测是作为找磁铁矿床的方法而产生并长期发展的。随着磁测精度的提高和基本理论的发展,磁测不仅能发现磁铁矿床,而且可能解决勘探方面的问题:确定矿体的深度,产状要素、磁化强度和估算磁铁矿石的储量。在这方面我国已有多个成功实例。

在间接找矿中,主要是用磁测查找在空间上或成因上与成矿有关的地层、构造、岩浆岩、蚀变岩石、矿化带等控矿因素。此外,利用所寻找矿种与磁性矿物的共生关系找矿,也属于间接找矿。目前磁力勘探的间接找矿作用,发挥的还很不够。

举世公认,磁测寻找磁铁矿床的效果最明显。在寻找其它类型铁矿以及铜、铅、锌、镍、铬、钼、铝土矿、金刚石、石棉、硼等各种金属与非金属矿床上,虽大都属于间接找矿,但也起到重要作用,富有成效。

### 一、寻找各类铁矿床

我国铁矿的主要类型有:前震旦纪变质铁矿、碳酸盐类岩石与中酸性侵入体接触带铁矿、火山岩中铁矿、基性侵入岩中铁矿等。

#### (一) 产在变质岩中的铁矿

此类铁矿通常称为鞍山式铁矿,其磁铁矿石的感应磁化强度达  $0.03-0.2\text{A/M}$ ,围岩变质岩的磁化率小,两者有明显的差异,当矿体出露地表,磁异常有明显的峰值,异常可达上万  $\text{nT}$ 。航空和地面磁测异常就成为寻找此类矿床的有效找矿标志。地磁异常多为条带状,具有明显的走向方向[2]。

#### (二) 产在中酸性侵入体与碳酸盐岩的接触带中的铁矿

此种铁矿产于中酸性侵入体,如闪长岩、花岗闪长岩与石灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩、钙质粉砂岩等碳酸盐岩石的接触带及其附近,在矿体附件往往可见矽卡岩。中酸性侵入体具

有磁性，可观测到明显的磁异常，碳酸盐岩石不具磁性，铁矿产于接触带及其附近，在碳酸盐岩石的平静磁场与侵入体磁场的过渡带上迭加的次级磁异常就成为磁测找此类铁矿的标志。

例如 3.4-30 是河北某地 1:10 万航磁图，图中有一个以 30nT 为接触带异常背景的孤立异常。由于异常位于某铁矿外围，有必要查明异常的地质原因。物探人员根据磁异常分布区出露有中奥陶统马家沟灰岩，此种灰岩在该区为成矿围岩，在航磁图上异常处于 30nT 背景边部，说明异常位于接触带上，处于成矿有利地段。据此，初步判定可能是矿异常。为查明该异常，又布置了 1:5000 比例尺的地面磁测，圈出了这个最大值只有 350nT 的低缓异常，见图 3.4-31。

图 3.4-30 河北某地磁铁矿上的航磁  $\Delta T$  异常

图 3.4-31 河北某地磁异常平面图

对上述异常经定性分析、定量计算，并研究了磁异常的空间分布和变化特点，根据当地矿体磁性参数和定量计算出的参数作了正演计算后，进一步确定为矿异常。经钻探验证证实了异常由磁性铁矿所引起。矿体为多层密集排列，而并非球形矿体，因其埋藏较深，故可近似看作球体。

### （三）产在火山岩中的铁矿

比类铁矿在我国统称为梅山式铁矿，可以分成两类，一是玢岩侵入火山岩中，分布在火山岩断陷盆地中间，以磁铁矿石为主；另一是玢岩侵入盆地基底层中，主要分布于火山岩断陷盆地边部或隆起断块中，以假象赤铁矿石为主。火山岩磁性比磁铁矿通常要小。考虑到火山岩磁场的干扰，用 1:5 万或 1:2.5 万比例尺航磁可发现铁矿异常。江苏某铁矿产于辉长闪长玢岩和黑云母安山岩接触带内即为此类矿典型一例，矿异常见图 3.4-32，异常呈椭圆状， $Z_{\max}$  达 7000 余 nT，异常南西陡而东北缓，反映矿体向北东方向侧伏。地表岩石磁性不强，不能引起该异常，结合重力  $\Delta g$  推断其为矿体引起。经验证证实了推断的正确。

图 3.4-32 江苏某火山岩铁矿磁异常综合平面图

- 1.一坡冲积层；2.一砂砾岩；3.一火山碎屑夹黑云母安山岩；  
4.一硅化高岭土化安山岩 5.一铁矿投影边界线；6.一物探推定矿体界线；  
7.一  $\Delta g$  等值线；8.一  $Z_a$  等值线；9.一剖面线；10.一地质界线

### （四）产在基性岩中的铁矿

当地槽褶皱期后或地台活化时，基性岩沿深大断裂侵入，生成钒钛磁铁矿。矿石具有强磁性虽基性岩具有磁性，但两者仍有差别，仍可借助不同异常特征可用磁测圈定岩体及矿体。

## 二、寻找其它金属矿与非金属矿

### （一）铜矿和铜镍矿

使用磁测找铜，一般分两种情况：一是含铜磁铁矿床；另一种是铜矿床中局部含有磁

铁矿或磁黄铁矿。

对于含铜磁铁矿床，铜与铁共生，使用磁测找铁间接找铜。如湖北某地，在进行 1:20 万比例尺航磁时，曾在一条测线上发现强度较大的磁异常。开始按铁矿勘探，后在强磁异常旁侧的次级低缓磁异常找到了深部含铜磁铁矿，才肯定了该矿床的工业价值。

对于矽卡岩型铜矿和超基性岩中的铜镍矿，往往局部含有磁铁矿或磁黄铁矿，这时磁测仍是找这两种矿的有效手段。但由于铜矿体的范围往往超过磁性矿物范围，所以磁测不能用来圈定矿体范围。超基性岩中的铜镍矿，磁异常除作为找矿的标志外，还用来圈定超基性岩体。如甘肃某铜镍矿产于二辉橄榄岩—辉石橄榄岩的超基性岩中，矿石中含有大量磁黄铁矿，磁化率比超基性岩大 4 倍左右，经 1:10 万航磁发现异常，经地磁检查后发现在矿区外围两个 1000nT 左右的异常，图 3.4-33，根据异常的错动，推测有平推断层。异常经钻探后在 50~100 米深处见到了岩体和矿体，现已成为我国大型的铜镍矿产地之一。

图 3.4-33 甘肃某矿区磁异常图

1-镍矿体；2-超基性岩体

## （二）多金属矿与锡矿

多金属矿中的矽卡岩型矿床，往往含有磁铁矿或磁黄铁矿，使用磁测较为有效。如河北某地的多金属矿，产于石英斑岩与震旦纪的外接触带。航磁异常反映为 250~500nT 的局部异常，经地面工作证实，强异常由磁铁矿化矽卡岩带引起，而其低缓磁异常系由深达 100 米以下的以钼为主的铁、铜、锌、钼多金属隐伏矿床所引起。

在许多锡矿区，往往有磁黄铁矿化，且其范围比锡矿化的范围大，发育更广泛。因此在这种矿床发育地段一般均有磁异常。在我国广西大厂锡矿床上就有这种特点。如大厂长坡矿区的地质—磁性模型，该模型浅部为陡产状体而深部为平缓层状体，反映了该区地质构造控制的特点，基于这样的模式指导进一步磁异常的解释；定量建立了大厂长坡及大福楼磁异常与锡矿推断关系图。利用这些推断结果而设计的钻孔，发现了新的矿床，其规模属大中型 [88]。

## （三）铬铁矿

铬铁矿产于超基性岩中，而超基性岩有较强的磁性，用磁测可以圈定超基性岩体，但能否从中区分出矿体异常，则要视矿体与岩体是否有磁性差异而定。如云南某地，铬铁矿产于浅变质的矽质粉砂岩、泥质板岩、千枚岩中，铬铁矿具有较强磁性，而围岩属浅变质岩磁性弱，因此，在铬铁矿上有数百 nT 的磁异常，见图 3.4-34，该区依据这些异常找矿，见矿率达 50%以上。

图 3.4-34 云南某地铬铁矿区磁异常图

## （四）基性与超基性岩中的石棉矿

由于石棉矿与基性、超基性岩有成因关系，而基性、超基性岩具有磁性，故利用磁测圈定这些岩体间接指出石棉矿的赋原部位。如辽宁某地层区内震旦纪厚层灰岩的平静磁场中

出现北西向分布的规则磁异常带，异常强度在 150~300nT，呈狭长带状、梯度较大，工区南部构造复杂，II 号异常走向变化为断层错动所致，见图 3.4-35。经多个钻孔控制，证实此磁异常带为与石棉矿共生的辉绿岩引起。

图 3.4-35 辽宁某石棉矿区磁异常带平面等值线图与剖面平面图

## （五）铝土矿

原苏联对铝土矿的磁测进行了较多研究，现介绍这方面的效果。对原苏联本土的铝土矿床可分为：①风化壳型（红土型）；②复成型（红土—沉积型）；③在地台、新地台及地槽褶皱区沉积型（再沉积型等类型）。其中地台型磁测效果最好。在海西期后地台中的沉积型铝土矿床赋存于碳酸盐岩发育区的剥蚀喀斯特，潜蚀喀斯特洼地段铝硅酸盐类岩石的河床与溶蚀洼地中，铝土矿床的分布与在老剥蚀面上碳酸盐岩（灰岩和白云岩）、碳质和火山岩层基底出露有关，构成的铝土矿充填在规模和深度各不相同、形状不规则的古老剥蚀喀斯特盆地中。矿层主要由石质、疏松质和粘土质铝土矿及其变种组成。这样地质条件下的 $\Delta T$ 异常一般由三部分组成：①花岗岩类侵入体（强度达 1000nT 以上的等轴状异常）；②基底为基性火山岩（强度为 100~600nT 的正异常）；③基底沉积层和疏松层中的磁性不均匀，其中包括铝土矿层。构成相应的 I、II 级迭加异常，因此需要细致地划分出第 III 级异常，为此应采用  $50 \times 10\text{m}$  以至  $25 \times 5\text{m}$  或更密的测网。区内铝土矿及其围岩的磁化率：杂色粘土为  $(36 \sim 48) \times 10^{-5}\text{SI}$  单位；铝土矿化粘土为  $(48 \sim 96) \times 10^{-5}\text{SI}$  单位；疏松铝土矿为  $(552 \sim 1020) \times 10^{-5}\text{SI}$  单位；石质铝土矿为  $(1260 \sim 9528) \times 10^{-5}\text{SI}$  单位，平均剩余磁化强度为  $1300 \times 10^{-3}\text{SI}$  单位，平均 Q 值  $\approx 0.5$ ，由此可见，磁测效果取决于矿石中的高磁性石质与疏松质铝土矿含量的多少。图 3.4-37 为库雷科利区  $\Delta T$  磁异常图，异常范围为  $100 \times 100\text{m}$ ，近等轴状，强度达 130nT，垂直梯度最大为 5nT/m，（图 3.4-36A），解释所得异常体，平均埋深 46m，形状为压扁的水平椭球体，通过钻探验证，在 34m 深处见到了石质铝土矿透镜体（图 3.4-36B）[87]。

图 3.4-36 库雷科利区  $\Delta T$  磁异常的地质、地球物理研究结果

a -  $\Delta T$  磁场结构；b - 磁场垂直梯度结构；B -  $\Delta T$ 、 $\frac{\partial \Delta T}{\partial h}$  曲线及钻探结果；  
1-亚粘土；2-杂色粘土；3-砂质水云母粘土；4-灰岩；5-石质铝土矿

## （六）硼矿

辽宁某地硼矿产于太古界变粒岩层（深变质岩）所夹大理岩中。有两种类型的矿体，一为硼镁石为主，含有磁铁矿的矿体；另一为硼镁石—硼镁铁矿共同组成的矿体。

磁铁矿—硼镁石矿的磁化率一般  $10000 \sim 15000 \times 4 \pi 10^{-6}\text{SI}$ 。虽然硼镁石矿体不具磁性，但可利用与硼镁石在成因上有空间关系的磁铁矿，采用磁测来寻找硼镁石矿。如图 3.4-37 所示，由已知矿体得知该区无磁性干扰，因此认为该异常以硼镁石为主的含磁铁矿的矿体所引起。对该异常进行验证，在 11-15 米深处见到了较大的硼矿体。

图 3.4-37 某地硼矿磁异常图

1-磁异常；2-打钻见到的矿体；3-见矿钻孔；4-根据物探异常打钻见到的矿体

## （七）金、铂、金刚石、钨等砂矿

在普查这些矿床时，可用地球物理方法圈出隐伏的古河床、河谷、矿囊以及其它在砂矿中堆积有重矿物的地段。这些重重矿物富集的地段常有磁铁矿。因此，普查隐伏砂矿时，常用垂向电测深法确定基岩表面地伏，若在基岩埋深最大的地段或古阶地上发现磁场增高，则能推测有磁性矿物。图 3.4-38 是根据电测深推断的一个隐伏古河谷，磁异常位于古阶地及其斜坡上，说明此处可能有含磁铁矿的砂矿。在该处打钻并采样，结果发现了含磁铁矿的砂钨矿。

图 3.4-38 用电测深法及磁法普查砂矿

1-粘土；2-砂砾；3-由电法确定的古代基岩地形；4-砂钨矿范围

## （八）磁性勘探在金属矿床中的应用

磁性勘探已在金属矿床（研究成因、确定时代、寻找矿源体）、石油天然气藏（土壤磁性确定油气田范围）、岩浆岩地质（区分岩体类型、确定成岩深度、岩体相带与岩体构造填图）、构造地质（褶皱、断裂、盆地分析）、环境监测等领域开展了研究与应用工作，应用较多的属于金属矿床。

### 1. 研究矿床成因

利用矿体和围岩是否具有相同的剩磁方向来区分矿体与围岩同生或后生。若方向一致则为同生，若不一致为不同时期形成。例如：江西永平铜硫矿床经研究发现，矿体的剩磁分为稳定和不安定两种，说明矿床的多成因；石炭系地层与矿体的磁倾角一致，二者时代相当，支持了矿床的层控学说；矽卡岩体和矿体的剩磁方向不一致，说明矿体与矽卡岩无关，为矿床成因提供了地球物理依据。

利用热剩磁和 Q 值对温度的记录作用可能提供的温度场信息，作为研究矿床成因的资料，研究认为：热源附近 Q 值小，远离热源 Q 值大，一般矿体中心部位 Q 值比边缘部位 Q 值小。如翠宏山和谢尔塔拉铁矿，根据 Q 值结构推测，不单纯为矽卡岩型矿床，还确定高温气水热液的重要作用。广西芒场锡多金属矿矿体中心 Q 值低、两侧 Q 值高确定为岩浆热液型矿床。

### 2. 寻找矿源体

以矿体或已知与矿体有关的岩体作为比较标准；在所有研究的岩体上采集定向标本，得到每个单元的剩磁矢量，经判别分析或直接比较它们是否与已知的磁性特征（如剩磁方向）一致。若是，则为矿源体，如在云南个旧锡矿、湖南柿园钨锡多金属矿区等进行了用剩磁方向寻找矿源体的研究，为矿区外围找矿指明了方向。

由于岩石磁参数是对成份以及结构、构造的综合反映，有利于成矿专属性的研究。统计资料表明：不同磁化率的花岗岩类具有不同的成矿专属性、弱磁性花岗岩形成 W、Sn 为主，中等磁性的岩体形成 Pb、Zn、Au 为主，磁性强的岩体则形成 Cu 矿。另一方面，花岗岩成矿专属性与磁性关系还表现在空间方面，如南岭含 W、Sn 矿的花岗岩磁化率低于不含矿的花岗岩的磁化率等。因此研究花岗岩磁性的空间分布也可为区域上评价含矿远景区提供

依据。

### 3. 寻找隐伏金属矿

土壤或岩石磁性用于寻找金属矿，目前尚处于试验阶段，多与地球化学测量同步进行。由于金属矿体可能引起上覆地层各位置不同的氧化还原电位的作用，导致磁性矿物的相变，而使土壤岩石的磁性变化。土壤磁性用于寻找金属矿，在前苏联工作较多，研究认为：一些地区土壤磁化率异常和地球化学异常有相同规律，两者在空间较为吻合。对于岩石磁性异常的研究，在我国癞子岭岩体的磁参数与原生晕对比后发现具有相关性，磁性异常与原生晕异常空间上吻合，利用磁性参数及其它指标共同圈定的异常已见矿[94]。对于火山岩覆盖区寻找隐伏硫化物矿床，由于矿体产生的氧化还原电位，使铁离子迁移和交换，从而改变含铁矿物的结构成分，使磁性发生变化，利用这种磁性变化来寻找硫化物矿床，在秘鲁的班岩铜矿取得了较好效果。

## 第六节 工程地质和水文地质研究

在解决工程地质和水文地质方面问题，磁测工作尚处于试验研究阶段。主要应用于研究滑坡地段与发现喀斯特地带和裂隙地带。

### 一、滑坡构造研究

俄罗斯在滑坡构造区进行了试验，分别选择①台地与斜坡；②侵蚀台阶、一次（底部）和二次（顶部）滑坡阶地两种地貌单元进行研究。前者滑坡过程涉及到晚第四系亚粘土和残积粘土层，滑动面位于地下 8~15m，斜坡上的滑坡体位移平均每年可达 3-4m（总坡长约 100m），坡度倾斜较小，滑坡过程形成的亚粘土粗裂隙，其强度及位置随时间而变，并与滑坡区岩石中的异常应力作用有关。后者滑坡基面为现代侵蚀冲沟。滑坡长约 230m，高约 100m，坡度剖面呈阶状，平均坡度 15°，滑坡体属良排水型，剥蚀和水文地质条件是滑坡发生的主要因素。

磁测工作的目的是获得滑坡地段岩石在异常应力作用下、岩石状态随时间、位置变化的信息，为此应选择的工作方法与技术应保证能对磁场微结构进行详细研究。这就决定了以下方法、技术特点：①磁测的高精度应能圈定并研究 1~3nT 的磁场变化或微异常；②用密测网发现 1~3m 范围内的近表不均匀性；③观测的工作方式应能研究磁场微结构随时间的变化，即在同一空间位置上，进行各自独立的循环观测；④在最重要的部位开展不同高度的观测，以求得不同深度（1 至 10m）地质体的异常效应；⑤在基准意义剖面进行磁测同时，对台地和斜坡上的小范围开展微磁测量，并在横穿滑坡构造与滑坡运动方向的延伸带上进行，以追踪整个构造带延伸方向上的磁场微结构变化。

在所研究的滑坡地带，微磁测可按：单条走向剖面、小面积、小地带等三种方式进行。微磁测的目的，是研究岩石块体的原生和次生组织结构及其随时间的变化情况。如对整个滑坡地带的岩石块体状况进行评价，则应从分水岭或远离台地的部位直至通向斜坡下部的条带开展微磁测（带内网度 2×1m）。微磁测结果的解释基础是分析微磁场等值线的延伸变化，并对数据统计处理（绘制方向玫瑰图）及某些其它单元异常统计标志。将这些标志，特别是  $\Delta T$  等值线玫瑰图与工程地质测量绘制的裂隙玫瑰图进行比较。

磁场微构造不仅可用来研究亚粘土的粗裂隙，而且还可以研究其在异常应力作用下所产生的微裂隙。在岩石未遭受滑坡过程的小测区上，微磁异常的等值线玫瑰图，主要反映岩石沉积时所形成的原生结构，这类玫瑰图的形状不规则，无明显的方向性。在开始有异常应力作用，但岩石尚未从台地岩块剥离的小测区上，微磁场玫瑰图的形状具有明显的方向性，

方向性表示了裂隙形成的方向。在地滑斜坡范围内,岩块已发生位移,明显的方向性被破坏。借助不同时间的多次微磁测,可以确定异常应力作用于岩石的开始时间,增强和衰减时间以及最大正常应力的作用方向等[87]。

由以上研究工作得出:小面积的微磁测(在与所有滑坡构造交切的小带内进行微磁测效果更好),不仅可以研究滑坡构造岩石的次生组织结构,而且可以预测滑坡过程的发展,圈定对滑坡发育中有潜在危险的台地区。

## 二、喀斯特与裂隙带

喀斯特。喀斯特溶洞形成于易溶岩石中,如:灰岩、白云岩、石膏、岩盐等。溶洞常常为砂质、粘土质物质所充填。喀斯特体实际上无磁性( $k$ 小于  $10^{-5}$ SI单位)而充填喀斯特溶洞的沉积物,则往往具有弱磁性[ $k \approx (25 \sim 40) \times 10^{-5}$ SI单位以上]。在这种条件下,在喀斯特上方,可能出现强度为  $10 \sim 20$ nT的正磁异常。对于埋深不大的(浅的)和出露的、无土壤植被覆盖的喀斯特,尤其适于用高精度磁测来发现。当喀斯特埋藏较深时,磁测反映与许多因素有关,包括:发育深度、充填疏松物的成分及其磁性特征、剖面中存在有其他磁性体等。疏松层覆盖下的隐伏喀斯特,磁测效果较差。疏松层成分中,有磁化率达  $(10 \sim 60) \times 10^{-5}$ SI单位以上的亚粘土。这类亚粘土引起的磁场,可能掩盖掉喀斯特引起的异常。经过构造变动,有时喀斯特溶洞降落到几百米的深处,其磁场反映,将首先与疏松物质的体积及磁性强弱有关。当充填物中存在铁质化合物、石质铝土矿等矿物时,将有利于喀斯特的发现。磁测比例尺由喀斯特的规模、研究的详细程度决定。

岩石裂隙。不论是在褶皱覆盖区,还是出露区,裂隙充水带乃是很多地区地下水的来源。用高精度磁力勘探方法对地下水进行普查和研究,主要是根据对裂隙带岩石的磁性变化,与同一成分或其他成分的岩石磁性特征进行比较而实现的。

在基岩和坚硬岩石中,裂隙带常常与构造破碎有关。其在磁场中表现形式多样,并与沿破碎带贯入的岩石成分及磁性、接触岩块的成分、构造活动作用下岩石磁性变化等因素有关。磁场表现为增大的线形异常或异常带、磁场特征的急剧变化带、磁场减弱带等。

根据俄罗斯的经验,这些带上的负异常强度可达  $10 \sim 15$ nT。疏松物的磁化率,由亚粘土和粘土的弱磁性[ $(10 \sim 50) \times 10^{-5}$ SI单位以上]所引起,而其磁性的减弱,显然与岩石受到的破坏及其次生变化、铁质化合物的加入和析出、或其在表生带中的改造有关。在微磁测中,根据玫瑰图等值线方向的急剧变化,将岩石裂隙带显示得十分清晰。

隐伏河谷。在普查残积层潜水时,圈定和追索隐伏河谷十分重要。在磁场图中,隐伏河谷可能表现为拉长了的负异常(当基岩磁性远远强于疏松物时),也可能为正异常(当疏松物磁性比基岩强时),还可能是串珠状正异常(由重矿物颗粒堆积及铁磁矿物冲积砂所引起)。在前两种情况下,预期异常强度不会超过  $10 \sim 15$ nT,在第三种情况下,不会超过  $10 \sim 30$ nT。

上层滞水。指的是砂层中的充水透镜体。当砂土的磁化率[ $(25 \sim 35) \times 10^{-5}$ SI单位]比粘土层[ $(0 \sim 25) \times 10^{-5}$ SI单位]高时,可采用高精度磁法勘探。这时砂土透镜体对应于强度增大  $10 \sim 15$ nT的磁场变化。

地基。包括坝基、路基、河道地基、煤气管道和隧道、工业建筑场地的地基等。对这种研究对象,高精度磁测可用来获取岩块成分及物理机械性方面的资料,如:地基和场地的岩石成分;构造条件、发现构造破碎、裂隙带;现代地质过程的发育情况;在工程建筑及生产过程中工程地质条件的变化等。



## 第七节 磁测在其它方面的应用

### 一、在煤田火烧区上的应用

在许多煤盆地中，在燃烧过的煤层上方有强磁异常。这是由于煤层中含有的氧化铁和氢氧化铁受高温作用变成磁铁矿的缘故。根据煤层燃烧的热剩磁特点，我国在西北三省的十七个勘探区二十二个测区用磁法和自然电场法探测煤田火区，取得了较好效果。

#### （一）煤田火烧区产生磁异常的原因

煤层露头自燃发火经历为：低温氧化、自热、着火与遍燃、燃烧、降温熄火过程，按发生发展的进程则煤层火区可分为五个带：①吸附水蒸发带；②挥发物涌出带；③发火带；④燃烧带；⑤还原熄灭带等。煤层经过燃烧。顶底板及其夹矸受到强烈的高温作用而形成烧变岩。顶底板中的铁质多数是赤铁矿、黄铁矿、菱铁矿、褐铁矿等随着烧变岩的形成大部分转变成磁性矿物，由于这种作用是从  $300^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$  高温下冷却发生因而获得热剩磁，且其磁化方向与冷却时的地磁场方向相同。火区观测到的磁异常就是由该温差剩磁性所引起。由此推测：还原带的烧变岩正处于降温阶段，尚未降到正常温度，所以只能得到部分热剩磁，熄灭带比还原带得到更多热剩磁，故推知后者的磁性要强于前者，发火与燃烧带尚未获得热剩磁。因而存在这样的磁异常特征：熄灭带磁异常最强；从熄灭带到燃烧带磁异常逐渐减弱；在涌出带和水蒸发带上观测不到磁异常。

#### （二）磁测在宁夏、新疆等地的应用

##### 1. 圈定煤田火区和老窑火区范围

在圈定火区范围时一般根据  $Z_a$  曲线特征，在煤层倾斜一侧的  $Z_a$  极小值点可定为下部边界，而在另一侧的  $Z_a$  零值点定为上部边界，当多层迭加时则要考虑这些特征点的迭加位移影响。在宁夏汝箕沟煤田应用磁测圈定了火区底界并经钻孔验证，结果和推断吻合[95]。

##### 2. 探索燃烧状态

图 3.4-39 是西山火区熄灭带的煤层。自然电位曲线平缓，而几层煤都有明显的磁异常，表明是熄灭区的正常磁、电反应、后为钻探证实。图 3.4-40 是宁夏汝箕沟火区的磁异常与自然电位曲线，自电出现台阶形曲线，反映了燃烧与降温熄灭两个大阶段，磁异常反映典型的从熄灭带到燃烧带异常减弱的特征[95]。

图 3.4-39 西山区熄灭带的煤层

图 3.4-40 宁夏汝箕沟火区一条剖面上的磁异常与自然电位曲线

##### 3. 确定煤层燃烧速度

1963 至 1965 年间在宁夏石咀山矿区和贺兰山煤田黑头塞井田、汝箕沟井田有燃烧的活动区，在 12 条剖面上作定期磁力观测，发现曲线在煤层倾斜侧的极小特征点都向倾斜方向推移，1965 与 1963 相比在石咀山矿特征点偏移了 4~8 米，可见火区燃烧速度约为 2~4 米/年。经钻孔验证结果与推断一致。

### 二、在地热调查中的应用

利用磁测可以勾划出热区的拗陷和基底构造，寻找控制地下热水资源的构造如断层和

火成岩体等。火山岩在正常情况下有一定磁性，在热水活动范围内，因热蚀变作用而使磁性降低，有利于利用磁测圈定热蚀变带。故不同地质成因的地热调查则可得到不同磁异常特征。下面介绍低负磁异常特征的地热田调查。

秦皇岛龙家店热田，地表为第四系覆盖，厚度 50~100m 之间，其下为区域变质的花岗片麻岩。地表水在下部增温后从破碎带上升到第四系中被一层粘土覆盖，形成热田。花岗片麻岩有较强的磁性，由于热退磁作用，使受到热水侵蚀的花岗片麻岩磁性减弱。由图 3.4-41 的  $Z_a$  曲线可见， $Z_a$  负异常基本上圈定了由于热水而使岩石蚀变产生的蚀变带，间接地确定了热水的存在，从而圈定了热水分布范围。视电阻率拟断面基本上确定了热水分布范围[92]。

图 3.4-41 秦皇岛龙家店热田地质物探综合剖面图

1-第四系覆盖；2-花岗片麻岩；3-断裂带

此外，西藏羊八井地区的航磁异常也具有明显的北东转南北向负异常特征，推测是盆地第四系、浅部花岗岩和深部热源的综合影响[91]。

### 三、在考古工作中的应用

随着高精度磁测工作的深入开展，磁力勘探已成为探查古遗存空间分布的主要地球物理方法之一。由于古地磁学的发展，使磁性地层学成为确定古遗存，古人类化石时代的重要手段。随着第四纪沉积物磁性特征深入研究，又为环境考古提供了新途径。下面以磁学机制为基础分别介绍空间考古、时间考古和环境考古等三方面的工作[90]。

#### （一）磁学机制

史期、史前期的古遗存（古遗址、墓葬、建筑等）或古人类化石本身及所处地层的磁性与周围环境有所差异，这种差异就构成磁学考古的基础。这种差异的起因在于：

①被火烧过的泥土制品、土壤、石块等可获得较强的磁性。这类物质因热作用的化学变化及获得热剩磁而使磁性增强。火烧过的物质要比一般土壤的磁性高出 1-2 个数量级。

②有机质的腐烂使土壤获得较强磁性。这是由于有机质腐烂的过程中。氧化还原作用使赤铁矿变为磁铁矿的结果。

③人为翻动过的土壤或夯土，因土质结构、密度等发生变化，以及掺入人工制品（陶片、烧土等）的残渣、颗粒等都可使其与周围天然沉积物之间出现磁性差异。如夯土磁化率增大，掩埋沟穴的虚土磁性相对减弱。因而在夯土的墓葬、墙基等上部可观测到明显的正（高）磁异常，其沟、穴上有负（低）异常。

④天然沉积物的颗粒在沉积过程中，受重力、水动力及地磁场力的控制。故沉积物的磁化率将是各向异性的，其磁化率椭球的长轴  $K_{max}$  将平行于水平的沉积面，在河相沉积情况下  $K_{max}$  轴向为水流控制。从而可以用来研究沉积物在形成时的水流方向。另外，沉积物在沉积及磁性获得的过程中与气候（如气温）环境相关。这种相关性在较厚的沉积剖面上显示出来。

考古对象因以不同方式获得磁性，这就为实现空间—时间及环境考古等提供了物理前提。

#### （二）、实际应用

##### 1. 空间考古

利用高精度磁测及磁性调整方法，确定考古对象的三维空间分布。图 3.4 为河南新郑

某处古墓葬的  $\Delta T$  磁异常图，测网线距 2m、点距 1m，由图可见，在已知墓葬 A、B、C 及大型陪葬坑上显示出有一定强度，轮廓明显的磁异常，如 A 异常清楚显示该墓有一较长的南北向墓道，墓室的东南侧有两个小耳室。据其形态考古工作者判定为汉代“甲”字型砖墓。B 异常的形态表明该墓为典型的“刀”字型砖墓，图中黑粗轮廓线是根据磁异常推断的结果。C 异常较弱，对墓的轮廓显示不清晰，这表明该墓为一土坑墓，非砖结构。E、D 异常反映的是两个新发现的墓葬。陪葬坑的磁异常南、北部分有较大区别，表明坑内有较多的陶器等物品主要堆放在坑的南半部，该区这些异常推断的遗存埋深地下 1~2m 左右。实际钻探证实了磁测结果的分析。

图 3.4-42  $\Delta T$  磁异常等值线图

1-零等值线；2-正异常等值线；3-负异常等值线；4-点号/线号

2004 年在陕西西安秦始皇陵投入了规模大、方法多的物探考古工作（刘士毅）。其中进行了测网为  $5 \times 5\text{m}$  的高精度  $\Delta T$  磁测，由于秦皇陵封土堆为一斜底平顶的四面锥体，底面平均高程约为 480 米，顶面高程约为 530 米，高出地面约 50 余米。该封土堆由上部盖层粗夯土、下部粗夯土及细夯土组成，磁性不均一，对磁异常  $\Delta T$  解释时，首先需消除封土堆的磁场影响，我们采用二度半组合体正演出封土堆  $\Delta T$  场，而后从实测场中减去封土堆场，得到剩余磁异常，再由剩余场用人机交互正反演方法，圈定出细夯土墙的轮廓，推测其为地宫范围，显示出高精度磁测的有效性。

## 2. 时间考古

在考古中常称断代问题，主要应用磁性地层学及磁性调查方法确定古遗存、古人类化石的生产或保存的时代。

当利用烧烤的陶器、壁炉、窑土等来断代时，所借助的是在他们经受最后一次烧烤时，获得的热剩余磁化强度，将当时当地的地磁场记录下来。若把需断代的古遗存用古地磁学中测定古磁场总强度的方法测出其总强度，然后把已知年代的古遗存测定古强度并作出与其相应的古磁场总强度关系曲线，以此作为年代与总强度的相关曲线。最后把需断代的古遗存的总强度与曲线对比查出相应年代。

磁性地层学方法是通过采集古人类化石等所处地层剖面的第四纪沉积物样品，测出该地层剖面的地磁极性变化柱，然后将此地磁极性柱与已知的国际地磁年表对比来确定地质剖面的地质时间区段及其古遗存所处的时间位置。用磁性地层特征确定湖北“郧县人”化石地层的时代即为典型一例，见[90]。

## 3. 环境考古

应用磁性调查方法研究考古对象周围第四纪沉积物的磁性参数特征，可了解考古对象所处的古气候、水的流向等环境因素。

对第四纪沉积物的磁性研究结果表明，沉积物的磁化率和天然剩余磁化强度值的大小可用来揭示沉积时的古气候情况。一般认为，它们的高值代表相对暖和（或热）的气候，否则相反[90]。

# 四、在特殊领域中的应用

## （一）寻找隐伏爆炸物和为公安侦破工作提供线索。

如在我国某基建工地利用磁通门磁力梯度仪发现并清除炮弹坑数个、铁磁干扰体上千

吨，迅速查清工地上的隐伏爆炸物，特别发现了同一地点 2 米与 5 米不同深度的炮弹。

为配合侦破工作，曾用梯度仪在湖南某河道把仪器主体置于橡皮舟上，探头携重物置于水中，用拖曳式作业进行磁测，虽未发现枪枝，仅发现数块约三平方公分的铁皮及一根钢丝（伞的骨架），从而否定了该处有枪枝的可能，从而改变了侦破思路[25]。

## （二）潜艇探测

利用低空航磁可以发现海中潜艇，潜艇虽经消磁但还有一定强度的磁异常可观测到。为了识别静止的潜艇，需要在监测的海域作高精度正常磁场背景的系统测量，以便能与测量磁场实时对比来发现异常，为了消除日变影响作梯度测量是可取的。

除上列应用外，在核电站选址与地震区划的基础地质研究，航磁与航空伽玛综合测量研究区域放射性背景与岩性关系；人文废弃物：垃圾掩埋场、废矿堆、废矿井、水中沉船与管道等探测均有较好效果。

## 习 题

1. 分析说明应用磁法的有利和不利条件
2. 判定磁异常的地质原因时，应注意些什么？
3. 为什么解决同一地质任务要应用综合物化探方法？
4. 论述应用磁测于煤田火区探测与考古的机理。