

井 中 磁 测

地质矿产部第一综合物探大队 编著

86年4月2日

地 质 出 版 社

井 中 磁 测

地质矿产部第一综合物探大队 编著

地 质 出 版 社

内 容 提 要

本书是在原《井中三分量磁测》一书的基础上写成的。书中总结了近十年的主要经验,并收集了大量有关资料,对原书作了较多的增补和修订,增加了有关磁化率测井的内容。

全书共七章,分别介绍井中磁测的基本概念、仪器、方法技术、基本理论、井中磁异常的初步解释、井中磁异常的定量计算、井中磁测的应用。对于从事井中磁测工作的生产、教学、科研人员,是一本很实用的参考书。

井 中 磁 测

地质矿产部第一综合物探大队 编著

责任编辑:张怀素 王文孝

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: $21^{5/8}$ 插页: 3个 字数: 507,000

1985年7月北京第一版·1985年7月北京第一次印刷

印数: 1—1,605册 定价: 5.25元

统一书号: 13038·新146

前 言

井中三分量磁测是配合钻探寻找地下深部磁性矿体并了解其赋存状况的有效手段。为了普及和推广这一方法技术,我队曾于1974年初,由黄衡远、刘天成、杨显勤执笔编著出版了《井中三分量磁测》一书和《井中三分量磁异常理论图册》,介绍了该方法的仪器原理、野外工作方法、资料整理和推断解释方法,对推动这一方法的开展起了一定的作用。

近年来,随着磁铁矿普查勘探的进展,井中磁测工作在方法技术上也有了进一步发展,除了测量磁场强度之外,又开展了磁化率测井,仪器和解释方法也都有了相应提高。为了进一步推动井中磁测的发展并满足有关人员对这方面技术资料的要求,我们在《井中三分量磁测》一书的基础上,总结了我队一〇一队近十年井中磁测的主要工作经验和成果,并收集了国内有关这方面的资料,改编为这本《井中磁测》。书中保留了原《井中三分量磁测》的主要内容,但作了比较多的增补,有些部分也作了适当调整和删节。仪器方面除主要介绍JSZ-II型仪器的原理和线路之外,还简介了JCL-1型小口径磁化率测井仪和JCX-1型小口径井中磁力仪,删去了半导体基本电路简介以及仪器操作步骤和检修等部分;方法技术中增加了 ΔZ 连续记录和磁化率测井,删去了误差分析部分,而将其中仪器的定向问题放入仪器有关章节加以讨论;解释推断方面作了较多的补充。比如正演理论、内磁场理论、矢量解释法及选择法等部分都增加了新内容,删去了弯曲斜孔井斜校正的方法;在应用实例方面也更换了一些更有代表性的例子,补充了磁化率测井的应用实例,并对解释推断的具体方法作了较详细的说明。

本书由地质矿产部第一综合物探大队一〇一队组织编写,黄衡远同志主编。书中第一、四章由黄衡远执笔,第二章一至四节由陈思南执笔,第五节由刘天成执笔;第三、七章由刘天成执笔;第五、六章由杨显勤执笔。经修改于1980年完稿,由刘天成和杨显勤完成最终稿的修改和补充。书稿大部分插图由黄绍冬同志完成,叶正芬和杨秀荣同志也参加了绘图工作。在编写过程中得到了许多兄弟单位的大力协助。桂林冶金地质研究所,重庆地质仪器厂,河北物探大队,武汉和长春地质学院物探系等科研、工厂、院校和生产单位都提供了不少资料。初稿编完后,又经武汉地质学院物探系蔡柏林同志、长春地质学院物探系徐顺同志以及重庆地质仪器厂、河北物探大队、内蒙古自治区物探大队有关同志审阅了初稿的有关章节,提出了宝贵的意见和建议。在此一并表示感谢。

目 录

第一章 井中磁测的基本概念	(1)
第一节 地磁场、正常场和磁异常	(1)
第二节 岩、矿石的磁性	(3)
一、物质的磁化	(3)
二、岩、矿石的磁性	(4)
三、岩、矿体的磁化强度与其形状之间的关系	(6)
四、几点认识	(8)
第三节 井中磁测方法原理	(9)
一、磁异常的形成及影响因素	(9)
二、井中磁异常的测量	(10)
三、井中磁测的原理	(12)
第四节 井中磁测的主要特点	(12)
一、仪器方面	(12)
二、解释方面	(13)
第五节 井中磁测的探测范围及其主要用途	(13)
一、探测范围	(13)
二、主要用途	(14)
第二章 井中磁测仪器	(16)
第一节 JSZ型三分量井中磁力仪	(16)
一、磁敏元件的基本理论	(16)
二、仪器的原理及线路	(19)
三、JSZ-I、II型三分量井中磁力仪的主要区别	(31)
第二节 JSZ型仪器读数方式的改进	(31)
一、仪器读数方法的改进	(31)
二、磁场垂直分量的连续记录	(34)
第三节 仪器的误差分析及定向问题	(41)
一、误差分析	(41)
二、直孔中定向方法的探索	(44)
第四节 JCX-1型小口径井中磁力仪简介	(45)
一、主要技术指标	(46)
二、仪器结构	(46)
三、仪器工作原理	(47)
第五节 JCL-1型磁化率测井仪简介	(49)
一、主要技术指标	(49)
二、仪器测量原理	(50)
三、仪器的方框原理及井下部分的线路	(53)
四、螺线管感应线圈的应用	(56)

第三章 井中磁测方法技术	(58)
第一节 工作地区的基本条件	(58)
第二节 野外工作方法技术	(59)
一、任务的接受和资料的收集	(59)
二、电缆的标记和曲线深度的确定	(59)
三、正常场的确定	(60)
四、井中磁测方法的测量技术	(61)
五、井中磁测的井场检查工作	(67)
第三节 岩、矿石磁参数的测定及数据整理	(69)
一、磁参数测定的目的和意义	(69)
二、岩、矿芯的选取	(70)
三、磁参数资料的统计	(70)
四、根据磁化率测井资料确定岩、矿石磁化率	(71)
第四节 资料的整理及图示	(76)
一、资料整理的意义及磁异常图的类型	(76)
二、各类磁异常图的含义及整理作图方法	(76)
三、井中磁测资料的剖面图示	(85)
四、利用磁场分量计算钻孔井斜方位和顶角	(87)
五、井斜投影方法	(89)
第四章 井中磁测的基本理论	(92)
第一节 井中磁异常的一般正演问题	(92)
一、磁性体外磁场的一般解析式	(93)
二、磁性体内磁场的一般概念	(95)
三、水平分量模差曲线 ($\Delta H'$) 的一般概念	(97)
第二节 若干规则体磁异常的解析式及其特征分析	(101)
一、点极、线极、磁荷面	(101)
二、半无限偶极面	(106)
三、斜交磁化无限延深板状体	(107)
四、双点极、球体	(110)
五、双线极、水平圆柱体	(115)
六、斜交磁化有限延深薄板状体	(119)
七、走向水平无限延深的四面体	(121)
八、椭圆柱体	(122)
九、三度板状体	(123)
十、综合分析	(124)
第三节 几种规则体磁异常的矢量特征	(127)
一、矢量轨迹、强度及顶角	(127)
二、矢量包络线	(139)
第四节 板状体的内磁场	(145)
一、一个界面的情况	(145)
二、两个界面的情况 (走向无限)	(148)
三、二度有限延深板状体	(149)

四、有井影响时的水平层	(153)
五、钻孔井壁磁荷面的影响及校正	(156)
六、不均匀磁化及多层结构的内场特征	(157)
第五章 井中磁异常的初步解释	(160)
第一节 区分矿与非矿异常	(160)
一、钻孔未穿过磁性体, 磁性体在其侧旁或下部	(160)
二、钻孔穿过磁性岩层	(161)
三、钻孔穿过磁性层, 在其侧旁还存在其他较强的磁性体	(161)
第二节 判断矿体的形状	(162)
一、利用磁异常曲线的某些特征点参数	(162)
二、利用 ΔT 矢量图的特征	(164)
三、利用 $\Delta Z-\Delta H$ 参量图	(165)
第三节 研究板状矿体的产状	(169)
一、磁异常形态特征的分析	(169)
二、利用 ΔZ 、 $\Delta H'$ 曲线极值比进行计算	(171)
三、利用二度体倾向方位与 ΔZ 和 $\Delta H'$ 曲线异常总幅度的比值关系来确定矿体的走向	(172)
四、 $\Delta Z-\Delta H$ 参量图法	(172)
五、利用矿体的内磁场确定产状	(173)
第四节 判断矿体与钻孔的相对位置	(177)
一、矿体在钻孔的侧旁还是下部的判断	(177)
二、矿体位于钻孔哪一侧的判断	(179)
三、矿体沿走向是否延过钻孔所在横剖面的研究	(182)
四、矿体中心或主部相对钻孔方向的判断	(183)
五、钻孔打在矿体不同部位的判断	(186)
第五节 近似计算矿体的埋深和距离	(188)
一、矿体埋深的近似计算方法	(188)
二、矿体与钻孔距离的近似计算方法	(189)
第六节 解释的简化及复杂异常的处理	(190)
一、复杂情况当作简单情况处理的条件	(190)
二、复杂异常的处理	(193)
第六章 井中磁异常的定量计算	(198)
第一节 解析法	(198)
一、特征点解析法	(200)
二、任意点解析法	(208)
三、切线法	(209)
四、列线图法	(217)
五、有关方法的评价及应用	(228)
第二节 矢量解释法	(229)
一、矢量交会法	(229)
二、矢量包线法	(232)
三、矢量轨迹法	(235)
四、矢量强度法	(238)

五、矢量曲线坐标法	(242)
六、矢量曲线坐标列线图法	(243)
七、有关方法的评价及应用	(246)
第三节 选择法	(246)
一、近似计算理论曲线的方法	(246)
二、有关解释的一些具体问题	(284)
第七章 井中磁测的应用	(289)
第一节 解释推断的一般原则及方法步骤	(289)
一、解释推断的一般原则	(289)
二、解释推断的一般方法步骤	(291)
第二节 判断异常性质, 验证磁异常	(295)
一、磁异常系岩石磁性所引起	(295)
二、磁异常为矿和岩石磁性的综合反映	(299)
三、磁异常为磁铁矿体所引起	(301)
第三节 指导钻进, 寻找盲矿体, 确定其空间位置	(303)
一、指导钻进	(304)
二、寻找盲矿, 确定其空间位置	(308)
第四节 确定矿体的延伸及见矿厚度	(314)
一、确定矿体的延伸和边界	(314)
二、确定被钻探打丢打薄的矿层的深厚度	(318)
第五节 研究板状矿体的产状	(322)
一、矿体东西走向, 南北倾向	(322)
二、矿体南北走向, 东西倾向	(322)
三、矿体非东西或非南北走向时倾向的确定	(324)
第六节 确定矿体的规模和范围, 对矿床进行储量计算	(326)
第七节 磁化率测井在井中磁测中的应用	(329)
一、区分外磁场和内磁场	(330)
二、提供井内连续的磁化率资料	(331)
三、应用 κ 测井资料研究矿石全铁品位	(335)

第一章 井中磁测的基本概念

井中磁测是磁法勘探向钻孔中的发展,它是以研究岩、矿石的磁性特征为物理基础的。不同磁性的岩、矿体将产生不同形态和强度的磁异常,在井中测定这些磁异常,并通过推断解释,解决地质勘探和找矿等问题,这就是井中磁测的目的。井中磁测的概念比较广泛,它包括磁场强度测量和磁化率测量两部分,但以前者为主。磁场强度测量就是测定磁性岩、矿体在它周围空间所产生的磁场强度的异常,这种测量可以是单分量的(一般是垂直分量)也可以是多分量的(一般是互相垂直的三个分量)。磁化率测量就是测定被钻孔所打到的岩、矿体的磁化率参数,可以测定岩、矿心标本,或者直接用仪器在井内测定,后者称为磁化率测井,它除了提供井内连续的磁化率参数外,还能解决不少地质问题,故亦是一种地球物理的测井方法。本书除明确指出磁化率测井的地方外,所提井中磁测的概念,一般是指井中磁场强度测量。

井中磁场强度测量与一般的地球物理测井方法的主要不同就在于前者是探测钻孔周围较大空间内磁性体磁场的总和,用来寻找钻孔周围和底部未被揭露的磁性矿体并研究其产状和规模等,后者主要是测量井壁小范围内岩、矿层的一些物理性质,从而用来确定岩、矿层的位置、厚度、及其它物理参数。因此,要了解井中磁场强度测量的方法实质,首先要掌握磁法勘探的一般基础知识以及此方法的主要特点。本章就这些问题作一简要的介绍。

第一节 地磁场、正常场和磁异常

人们很早就发现了磁石吸铁的现象。磁石即磁铁,其化学成分为 Fe_3O_4 ,磁铁能吸引铁、镍、钴等物体的性质就称为磁性。磁性物质的磁极之间相互都有力的作用,而且是同号磁极相斥,异号磁极相吸。磁性物质之间有力的作用,这是因为在它们的周围空间具有磁场。磁针在地球上任何地方都受到磁力的作用,这表明地球本身就是一个大磁体,在它周围空间各点都存在着磁场,这种由地球本身所产生的磁场就称为地磁场。地磁场的方向可以用磁针大致确定。把磁针悬在空中它会自动地转向南北方向,其正极(N极)指向北,负极(S极)指南,由此可知地球磁体的N极在地理南极附近,S极在地理北极附近。

地磁场是一种向量,它既有大小又有方向,通常用矢量 $\boldsymbol{T}$ 来表示。为了便于研究,我们往往将 $\boldsymbol{T}$ 分解成直角坐标系上的几个分量。这个坐标系的 x 轴沿地理子午线,指北为正; y 轴沿地理纬线,指东为正。这两个轴都在水平面内。另一个 z 轴则垂直向下。矢量 $\boldsymbol{T}$ 在 z 轴上的投影叫垂直分量,以 Z 表示; $\boldsymbol{T}$ 在水平面 xoy 上的投影叫水平分量,以 H 表示; H 在 x 轴上的投影叫北分量,以 X 表示; H 在 y 轴上的投影叫东分量,以 Y 表示。 x 轴与 H 分量间的夹角磁偏角(D); $\boldsymbol{T}$ 与水平面的夹角叫磁倾角(I) (图1—1—1)。我们规定向量 H 由北向东的磁偏角为正,向西为负。向量 $\boldsymbol{T}$ 在北半球指向地平线之下, I 为正,指上为负。

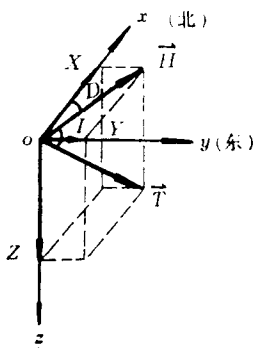


图 1-1-1

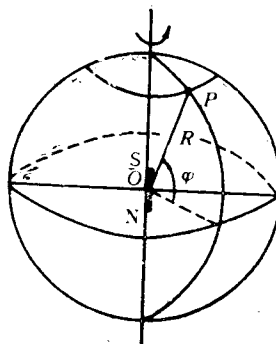


图 1-1-2

X 、 Y 、 Z 、 D 、 H 、 I 都称为地磁要素，其中 (H, Z, D) ， (X, Y, Z) ， (H, D, I) 为独立的三组，知道任一组就能求出全部地磁要素。各要素的相互关系如下：

$$\begin{cases} X = H \cos D, & Y = H \sin D, & Z = H \operatorname{tg} I, \\ H = T \cos I, & Z = T \sin I, & \operatorname{tg} I = Z/H, \\ H^2 = X^2 + Y^2, & T^2 = H^2 + Z^2, & \operatorname{tg} D = Y/X. \end{cases}$$

为了定量地了解地磁场在地球表面不同位置的变化情况，可以用数理的方法来计算。理论研究表明，地面上任一点 P 的磁位 U 可以用球体磁位的表达式来近似地表示：

$$U = -\frac{M}{R^2} \sin \varphi \quad (1-1-1)$$

式中 φ 是地理纬度； M 是地球总磁矩； $R = \overline{OP}$ = 地球半径（图1-1-2）。假定地磁轴（即 S 、 N 磁极的连线）与地球转动轴相重合，则 P 点处的磁场强度可写成下式：

$$\left. \begin{aligned} X = H &= -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial \varphi} = \frac{M}{R^3} \cos \varphi \\ Z &= -\left(-\frac{\partial U}{\partial R}\right) = \frac{2M}{R^3} \sin \varphi \\ T &= \sqrt{H^2 + Z^2} = \frac{M}{R^3} (1 + 3 \sin^2 \varphi)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

$$\text{另外：} \quad \operatorname{tg} I = \frac{Z}{H} = 2 \operatorname{tg} \varphi \quad (1-1-3)$$

根据地球上某些点的实测磁场值，可以计算出地球的磁矩为 $M = 8.3 \times 10^{25} \text{CGSM}$ 。如取地球的半径 $R \approx 6000$ 公里，将 M 、 R 值代入 (1-1-2) 式，并假设不同的 φ 值，就可计算出地球上不同纬度处的地磁场值：

$$\text{在赤道处 } \varphi = 0^\circ, \quad Z = 0, \quad H = T = \frac{M}{R^3} = 0.38 \text{CGSM};$$

$$\text{在两极处 } \varphi = 90^\circ, \quad H = 0, \quad Z = T = \frac{2M}{R^3} = 0.76 \text{CGSM}.$$

亦即 T 在两极处的强度比在赤道处大一倍。 Z 在赤道处为零，在两极处最大； H 在两极处为零，在赤道处最大。利用 (1-1-2) 和 (1-1-3) 式，我们便可根据工区所在地的纬度大致估计当地的地磁场大小和方向。

但是以上的计算只是地磁场实测值的一级近似值，而在某些地区，实测值与均匀磁化球体的理论计算值就有很大的偏差，这是因为地球表面的岩石磁性实际上是不均匀的，影响地磁场的因素也比较多。研究结果表明，一般认为地磁场 T 是由下列几部分构成的：

$$T = T_n + T_m + T_a + T_e + \delta T$$

式中 T_n ——由上述均匀磁化球体所产生的磁场，称为基本磁场；

T_m ——地壳内部非均匀构造所引起的磁场，称为大陆磁场；

T_a ——地壳表层非均匀磁化所引起的磁场，称为异常磁场；

T_e ——地球以外的原因，如大气圈中的电离层及太阳宇宙射线所引起的磁场，约占总磁场的1%；

δT ——磁场随时间变化的部分。数值很微小。

均匀磁化球体所产生的磁场 T_n ，来源于地球的核心，其成因有过许多推测，但至今尚无完满的解释。比较多的认为，这种磁场是由地核内部的电流所产生的。大陆磁场 T_m ，分布的面积很大，达数万平方公里，表现出陆地与海洋磁场的差异，前者基底为花岗岩，磁性弱，后者基底为玄武岩，磁性强。磁异常 T_a ，按其成分又可分为两类，即由较深大的区域地质构造所引起的区域异常 T_a' 和较浅较小的地质体所引起的局部异常 ΔT 。

通常 T_n 、 T_m 和 T_e 对于某一工作地区来说实际上是不变的，它们在实测磁场值里是一个固定的部分，所以把它们合起来称为正常场 T_0 ：

$$T_0 = T_n + T_m + T_e$$

δT 的数值很小，一般只在几十伽偶范围内变化，对井中磁测来说可以忽略不计，所以地磁场 T 可写成：

$$T = T_0 + T_a$$

对于航空磁测或大面积的地面磁法工作来说，可以利用 T_a 中的 T_a' 部分研究地球表面的区域性地质构造；如果磁法勘探的目的，是要解决小的、局部的地质问题，例如井中磁测主要是用来寻找钻孔周围盲矿体，则在目前所能达到的钻孔深度（一般小于1000米）范围内， T_a' 实际上也可看作是常数，此时正常场为

$$T_0 = T_n + T_m + T_e + T_a'$$

则

$$T = T_0 + \Delta T$$

在井中磁测的实际工作中，是用仪器在井中测出各点的磁场绝对值 T ，然后减去正常场 T_0 ，从而得到与所要研究的磁性体有关的磁异常 ΔT ，这就是我们最终需要研究的对象。由于 ΔT 是由局部磁性体产生的，它的特征就与这些磁性体的磁性特点有关。因此，为了更好地了解磁异常的性质，就要研究各种岩、矿体的磁性特点。

第二节 岩、矿石的磁性

一、物质的磁化

物体被磁化的过程就是其内部分子磁矩沿外磁场的方向整齐排列起来的过程，这时，物体具有一定的总磁矩，亦即呈现出磁性。显然，物体的总磁矩 (M) 与其体积 (V) 有关，体积越大，总磁矩越大，其磁性也越强。为了消除体积的影响，通常用磁化强度 J 这

个物理量来表示物体被磁化的程度。磁化强度 J 就是单位体积的磁矩：

$$J = \frac{M}{V} \quad (1-2-1)$$

但是 J 还与磁化场 T 有关。一般 J 与 T 成正比，而且对于不同的磁性体，在相同的外磁场作用下，也会具有不同的磁化强度，因此，需要引入另一个物理量 (κ) 来表征物体磁性的大小：

$$\kappa = \frac{J}{T} \quad (1-2-2)$$

κ 称为物体的磁化率，即单位外磁场强度作用下物体所具有的磁化强度，它是表示物体磁化时的难易程度的物理量，物体的 κ 值越大，就越容易被磁化。 J 、 T 、 κ 的单位是这样规定的：在CGSM制中 $T=1$ 奥斯特 (Oe)， $J=1$ CGSM，则 $\kappa=1$ CGSM。 κ 既为一比例系数。若 J 与 T 取不同单位时， κ 值也不同。故当 J 、 T 都取CGSM单位时， κ 也用CGSM单位来表示，借以表明 J 及 T 的单位。

二、岩、矿石的磁性

地下的岩、矿石从它们形成之日起，就处在地磁场中，被地磁场所磁化。岩、矿石的磁化与物质的磁化是一样的道理，只不过地磁场对岩、矿石的磁化是长期的，在磁化过程中岩石又可能经历了各种变化，使磁性变得更为复杂。地磁场对地下不同深度处的岩、矿石都能磁化，但磁化深度一般不超过20—30公里，因为再往深处，地下温度就要高于岩、矿石的居里点，至使岩、矿石失去磁性。

岩、矿石的磁化强度 (J) 包括两部分，即感应磁化强度 J_i (简称感磁) 和天然剩余磁化强度 J_r (简称剩磁)：

$$J = J_i + J_r \quad (1-2-3)$$

J_i 主要取决于岩、矿石的磁化率 κ 和作用于岩、矿石的地磁场 T ，对于均匀无限的磁性体，可以写成 $J_i = \kappa T$ 。但当磁性体形状有限时，磁化的结果将产生退磁场，按上式计算出的磁化率只是视磁化率 κ' ，还应作退磁校正。

J_r 是当岩、矿石生成时在各种复杂的地球物理和地质因素作用下产生的。一般的岩石具有很大的矫顽力，因此， J_r 可以在岩石中一直保留下来，且不受现代地磁场的影响，而保持其原有的大小和方向。几乎所有的火成岩和大部分陆屑沉积岩都具有剩余磁化强度。关于火成岩 J_r 的成因问题，目前虽无肯定结论，但多数公认的是温差顽磁性理论。这种理论认为火成岩的剩余磁性，是岩石在地磁场中由高温冷却后所得的温差顽磁性。

岩、矿石的磁性取决于很多因素，其中起决定影响的是岩、矿石的矿物成分。铁磁性矿物是矿物中磁性最大的一种，因此，一般地说，磁性矿物含量愈多，岩、矿石的磁性也愈强。此外，铁磁性矿物的颗粒大小和形状，以及生成岩、矿石时的磁化场强度和温度，也对岩、矿石磁性有不同程度的影响。

一般地说。在岩石中以火成岩的磁性为最强，沉积岩磁性最弱，变质岩的磁性介于两者之间。

火成岩由酸性岩到基性岩，二氧化硅含量逐渐减少，而铁磁性矿物含量逐渐增多，岩石磁性也就增强。同一成分火成岩，侵入岩与喷出岩的磁性也有所不同。一般喷出岩的磁

性变化较大，剩磁相对地大些。其中基性喷出岩的磁性最特殊，它常有较大的剩磁强度，有时方向与地磁场相反（所谓反转剩余磁化）。不同时代的同一种火成岩往往具有不同的磁性，例如我国东北某地海西期花岗岩 κ 常见值为 1150×10^{-6} CGSM，而燕山期花岗岩 κ 常见值为 340×10^{-6} CGSM。另外，同一岩体的不同岩相带，例如花岗岩的中央相与边缘相，基性与超基性岩的不同岩相带，其磁性也都有差别。火成岩的 κ 值一般是几百—二万 $\times 10^{-6}$ CGSM，其剩磁比感磁往往要大得多。剩磁的方向一般在 $\pm 10^\circ$ 范围内变化。比值 $Q = J_r/J_i$ 一般可达2—10，在某些玄武岩中超过100，也有少数情况 $Q < 1$ 。

沉积岩的磁化率比火成岩、变质岩小很多，除少数情况外，一般磁化率不超过 100×10^{-6} CGSM。剩磁则更小，约为 $n \times 10^{-6}$ CGSM。在磁法勘探中往往把沉积岩看作是“非”磁性的。

变质岩的磁性主要取决于变质前的岩石的磁性。在片麻岩中，正片麻岩磁性与花岗岩接近，而副片麻岩磁性很弱，与泥沙岩相近。纯大理岩和石英岩磁性很弱，千枚岩磁性稍强。如果这些岩石含有铁质，磁性就会增强，因此，含铁石英岩、铁质千枚岩等磁性均较强。由超基性岩变质生成的蛇纹岩，角闪石片岩（或角闪石岩）等，往往具有很高的磁性。在具有层状结构的变质岩中，往往还具有磁的各向异性， J_r 的方向接近于片理方向，在这个方向上磁化率值比垂直片理方向大。

各种磁铁矿石，其主要成分为磁性很强的铁磁性矿物，如磁铁矿（ Fe_3O_4 ）、钛磁铁矿（含有大量 TiO_2 的天然磁铁矿）、磁赤铁矿（ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ）、磁黄铁矿（ $\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}\text{-Fe}_6\text{S}_7$ ）等，因此在矿石中具有最高的磁性。其 κ 值变化范围在0.01—1CGSM，剩磁变化也具有同样级次，有时剩磁比感磁还要大，因此，在研究矿石磁性时，不应忽视剩余磁化强度。

磁铁矿石的磁性虽然与其中磁铁矿物的含量有密切的关系，研究表明，它们之间一般并不存在正比关系。因为矿石的磁性还受到其它多种因素的影响，例如胶结物的磁性，其它磁性矿物和铁氧体以及磁性矿物的颗粒大小等。

变质铁矿床的矿石（如含铁石英岩）的矿物成分主要与沉积条件有关，并对磁化率有很大影响。随着氧化环境的不同，形成各种类型的矿石，有赤铁矿、磁铁矿，也有的含磁铁矿、褐铁矿及铁的硅酸盐矿物。其中以含磁铁矿的磁性最高。磁铁矿含量主要决定于沉积过程，颗粒大小则决定于变质过程。

表 1—2—1

岩矿名称	标本块数	磁化率 κ (10^{-3} CGSM)		剩磁 J_r (10^{-3} CGSM)		$Q = \frac{J_r}{J_i}$
		变化范围	平均值	变化范围	平均值	
磁 铁 矿	2938	0—10170	114	3—180	24.6	0.43
其它铁矿	>228	0—2.42	1.1	0—21.7	3.45	6.3
中酸性火成岩	1759	0—50	4.0	0—81.5	10.7	5.4
酸性火成岩	1110	0.1—50	<2.78	0.1—50	16.0	11.7
超基性侵入岩	—	0—20	2.57	0.25—38	3.9	3.0
基性侵入岩	355	0.02—28	4.43	0.2—8.1	1.2	0.54
中酸性侵入岩	6932	0—7.5	2.07	0—4	0.9	0.86
变 质 岩	381	0—36.7	1.47	0—0.74	0.166	0.23
沉 积 岩	4859	—4—6.3	0.12	0—650	0.018	0.31

磁铁矿石经氧化后，磁性显著降低，这是因为磁性强的矿物分解成其它磁性较弱的矿物。

表(1-2-1)是根据大量的测定结果编成的几种主要岩、矿石的磁性数据。

三、岩、矿体的磁化强度与其形状之间的关系

前面已经谈到，对于无限大磁性介质来说， $J_i = \kappa T$ 。若介质为有限时，由于磁荷端面的影响，磁性体本身还产生一磁场，它与外磁场方向相反，称为退磁磁场，以 T_e 表示。例如图1-2-1所示，当外磁场垂直于无限大薄板的板面时，在 a 面感应出负磁荷，在 b 面感应出正磁荷，它们在板的内部也将产生一个大小与磁化强度 J 成正比，方向与 T 相反的附加磁场（即退磁磁场）：

$$T_e = -NJ \quad (1-2-4)$$

比例系数 N 称为物体的退磁系数（或消磁系数）。

由于 T_e 的存在，使板状体内磁场 T_B 削弱了，它实际上不等于 T ，而是 T 与 T_e 之和，即：

$$T_B = T - NJ$$

因为 $J = \kappa T_B$ ，代入上式得：

$$T_B = \frac{T}{1 + \kappa N}$$

两边再乘以 κ ，则得：

$$J = \frac{\kappa T}{1 + \kappa N} = \kappa' T \quad (1-2-5)$$

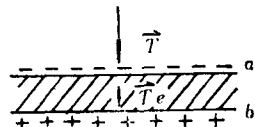


图 1-2-1

κ' 称为视磁化率， κ 与 κ' 的关系是：

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1 + \kappa N} \quad \text{或} \quad \kappa = \frac{\kappa'}{1 - \kappa' N} \quad (1-2-6)$$

κ' 不仅与 κ 有关，还与物体形状有关，而 κ 只与介质本身性质有关。当 $N=0$ 时， $\kappa'=\kappa$ ，一般情况下， $\kappa'<\kappa$ 。退磁系数 N 取决于物体的形状，当均匀磁化，且物体形状规则时，可用数学方法计算出 N 值，然后对 J 值进行改正。对于不规则形状物体的退磁系数，无法计算，只能由实测方法求得。

几种规则体的退磁系数如下：

$$1. \text{圆球体（等轴状体），各个方向 } N \text{ 都一样， } N = \frac{4}{3} \pi \quad (1-2-7)$$

2. 椭球体

设椭球体三个半轴为： a 、 b 、 c ，其中 $a=b \neq c$ 成为旋转椭球体。

当 $a=b < c$ ，即为长球体时，平行 c 轴方向的退磁系数为

$$N_c = 4\pi \left(\frac{1}{e^2} - 1 \right) \left(\frac{1}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} - 1 \right) \quad (1-2-8)$$

垂直 c 轴方向的退磁系数为

$$N_a = 2\pi \left(\frac{1}{e^2} - \frac{1-e^3}{e^3} \ln \frac{1+e}{1-e} \right) \quad (1-2-9)$$

上两式中 $e = \sqrt{\frac{c^2 - a^2}{c^2}}$ —— 椭球体的椭圆率。

当 $a = b > c$, 亦即为扁球体时, 平行及垂直于 c 轴的退磁系数分别为:

$$N_c = 4\pi \left(\frac{1}{e^2} - \sqrt{\frac{1-e^2}{e^3}} \sin^{-1} e \right) \quad (1-2-10)$$

$$N_a = 2\pi \left(\sqrt{\frac{1-e^2}{e^3}} \sin^{-1} e - \frac{1-e^2}{e^3} \right) \quad (1-2-11)$$

式中 e 仍为椭圆率, $e = \sqrt{\frac{(a^2 - c^2)}{c^2}}$

3. 圆柱体

平行柱轴方向, $N \approx 0$ (1-2-12)

垂直柱轴方向, $N = 2\pi$ (1-2-13)

4. 椭圆柱

设椭圆柱的长、短半轴为 a 和 b , 则

沿长半轴方向时: $N_a = 4\pi \frac{b}{(a+b)}$ (1-2-14)

沿短半轴方向时: $N_b = 4\pi \frac{a}{(a+b)}$ (1-2-15)

5. 薄板状体

沿板面方向时: $N = 0$ (1-2-16)

垂直板面方向时: $N = 4\pi$ (1-2-17)

不规则形状物体的退磁系数可按下列法求得:

将不规则形状做成空壳模型, 其体积为 V , 在模型内填入磁化率值已知为 κ_0 的磁介质粉末, 测定其总磁矩 M , 则可计算出:

$$J = \frac{M}{V}, \quad \kappa_0' = \frac{J}{T} \quad (T \text{ 为磁化场})$$

于是退磁系数:

$$N = \frac{(\kappa_0 - \kappa_0')}{\kappa_0 \kappa_0'} \quad (1-2-18)$$

由以上计算结果可知, 各种规则体退磁系数的变化范围为 $0-4\pi$ 。物体的退磁校正, 只在磁性较强时才有必要, 因为对弱磁性体来说, 产生的附加磁场 T_s 是很小的, 可忽略不计。如果把误差小于 10% 的情况作为可以不考虑退磁影响的标准, 那么可根据 (1-2-5) 式估计不需作退磁校正的最大 κ 值。此时:

$$\frac{1}{(1 + \kappa N)} = 0.9$$

取 N 的最大值 4π 代入, 得:

$$\kappa = 0.0088 \text{ CGSM}$$

因此, 我们可以取 $\kappa = 0.01 \text{ CGSM}$ 作为一种数量界限, 当 $\kappa < 0.01 \text{ CGSM}$ 时, 即使不作退磁校正, 其误差也小于 10%, 此时可用简单公式 $J = \kappa T$ 来确定物体的磁化强度; 当 $\kappa >$

0.01CGSM 时, 必须考虑到退磁影响。

对强磁性体来说, 不同形状的物体有不同的退磁系数, 而且影响的程度也不相同。对于等轴状球体或垂直柱轴磁化的圆柱体, 退磁作用的影响只改变 J 的强度而不改变其方向, 因为此时内部产生的附加磁场的方向完全与外磁场相反。对于截面呈现一定倾斜的物体来说, 由于在长短轴两个方向上, 退磁系数不同, 因此产生的内磁场与外磁场方向有一个交角, 这就不但改变了 J 的数值也改变了它的方向。现举一个倾斜薄板的例子来说明。

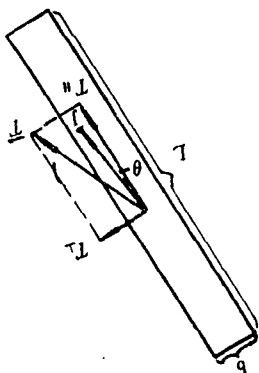


图 1—2—2

设板的 $\kappa=1\text{CGSM}$, 倾角为 70° , 磁化场 $T=0.5$ 奥斯特 (Oe), T 之倾角为 45° , $L \gg b$ (图1—2—2)。将 T 分解成平行和垂直于板面的两个分量 $T_{\parallel}$ 、 $T_{\perp}$, 则:

$$T_{\parallel} = T \cos 25^\circ = 0.453 \text{ Oe}$$

$$T_{\perp} = T \sin 25^\circ = 0.211 \text{ Oe}$$

根据 (1—2—5)、(1—2—16)、(1—2—17) 式:

$$J_{\parallel} = \kappa T_{\parallel} = 0.453 \text{ O. (不考虑退磁影响, 因 } N \approx 0)$$

$$J_{\perp} = \frac{\kappa T_{\perp}}{1 + 4\pi\kappa} = 0.0155 \text{ O. (考虑退磁影响, 因 } N = 4\pi)$$

$$\therefore J = \sqrt{J_{\parallel}^2 + J_{\perp}^2} = 0.453 \text{ O.}$$

$$J \text{ 与板面夹角 } \theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{0.0155}{0.453} \right) = 2^\circ 6'$$

由此可见, 由于退磁影响, 不仅使 J 值降低了, 而且其方向总要偏向物体退磁系数小的方向, 亦即有顺层磁化的趋势。这种情况, 我们在解释时是应当注意的。

四、几点认识

综上所述, 我们对岩、矿石磁性有下列几点认识:

1. 磁性是岩、矿石的重要物理参数之一。不同岩类, 其磁性差异是很大的, 即使同一种岩类, 不同岩石也具有一定的磁性差异。特别是, 在大多数情况下, 磁铁矿石比其它任何岩石具有大得多的磁性, 这些磁性差异就是井中磁测或其它磁法勘探用来找矿或研究某些地质问题的物理基础。因此, 我们首先应该对所在工区的岩、矿石磁性有一个比较全面的了解。

2. 岩、矿石的磁性与很多因素有关, 例如矿物成分、颗粒、形状、大小, 矿体的形状以及成矿条件等等, 因此, 是一种比较复杂的参数。对相同岩、矿石进行个别抽样测量时往往会得到迥然不同的结果, 这是因为岩、矿石的矿物成分和微观结构很不均匀。因此岩、矿石的磁性是一种统计数值, 只有通过大量岩、矿标本的测定和合理的统计才能得到比较正确的磁性概念。

3. 岩、矿石的磁化强度是由感磁和剩磁两部分组成的。大部分火成岩、特别是基性和超基性火成岩以及磁铁矿体都有很大的剩余磁性, 有时剩磁比感磁还大, 因此, 我们在研究岩、矿石磁性时, 不仅要测定它的磁化率 (从而推算感磁) 而且要测定其剩磁。不仅

要知道剩磁的大小，也要尽可能掌握它的方向。经验表明，多数情况下剩磁与感磁同向，但在少数情况下，剩磁和感磁的方向相差很大，甚至出现方向相反的现象，我们必须注意这一点。

4. 在确定岩、矿石磁参数时，还应考虑到由于地质体形状不同所产生的消磁影响。磁性体的磁性越强，消磁影响越大，应当加以校正。对于非等轴状物体，消磁作用不仅影响磁化强度的大小，而且也影响其方向，在解释时需要加以考虑。

第三节 井中磁测方法原理

一、磁异常的形成及影响因素

理论研究表明：磁场是由物质的分子电流产生的。为在数理上研究方便起见，一般仍采用假想的磁荷或磁荷面作磁场源。当物体被均匀磁化时，可以认为磁荷都集中在物体的表面，这些磁荷分布的位置和密度（ σ ）不同就产生各种不同的磁异常。

磁荷的分布状况主要取决于磁化强度 J （包括大小和方向）与物体的形状。我们来讨论一下 J 与 σ 的关系。若有一个圆柱体受到沿轴方向的外磁场 T 的均匀磁化，在它的上、下端面（面积为 S ）将产生磁量为 m 且均匀分布的正、负磁荷（图1—3—1）。此时，圆柱体的磁矩为： $M = lm = l \cdot S \cdot \sigma = V\sigma$ 或者 $\sigma = \frac{M}{V} = J$ 。这是 J 与 S 面垂直的情况。若 J 与物体表面不垂直，而有一个夹角 α ，则有效磁化强度 $J_n = J \sin \alpha$ （图1—3—2），此时： $J_n = \sigma$

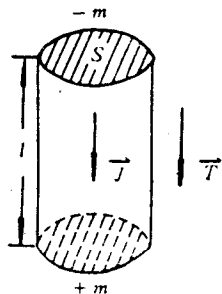


图 1—3—1

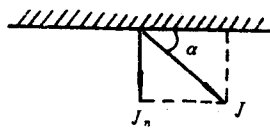


图 1—3—2

显然，当 $\alpha = 0$ 时（ J 与物体表面平行） $\sigma = 0$ ；当 $\alpha = 90^\circ$ 时（ J 与物体表面垂直） $\sigma = J$ 。

综上所述，当磁性体被外磁场均匀磁化时等效于在磁化场磁力线进入的那一端感应出负磁荷，出去的那一端感应出正磁荷，其面磁荷密度的大小，在数值上等于磁化强度 J 在该面法线方向上的投影。由此可知，磁化强度的大小和方向以及磁性体的形状、产状等决定了空间磁荷分布的状况，而后者便产生不同特征的磁异常，这就是磁异常形成的内因（磁源）。我们再以二度体磁异常的垂直分量（ ΔZ ）更具体地说明这个问题。假定钻孔为直孔，而且距磁性体中心的距离不变，我们来研究一下磁异常怎样随磁源的不同而改变（见图（1—3—3），图中虚、实曲线相应为虚、实线截面的矿体及虚、实线的 J 矢量所产生的 ΔZ 曲线）。