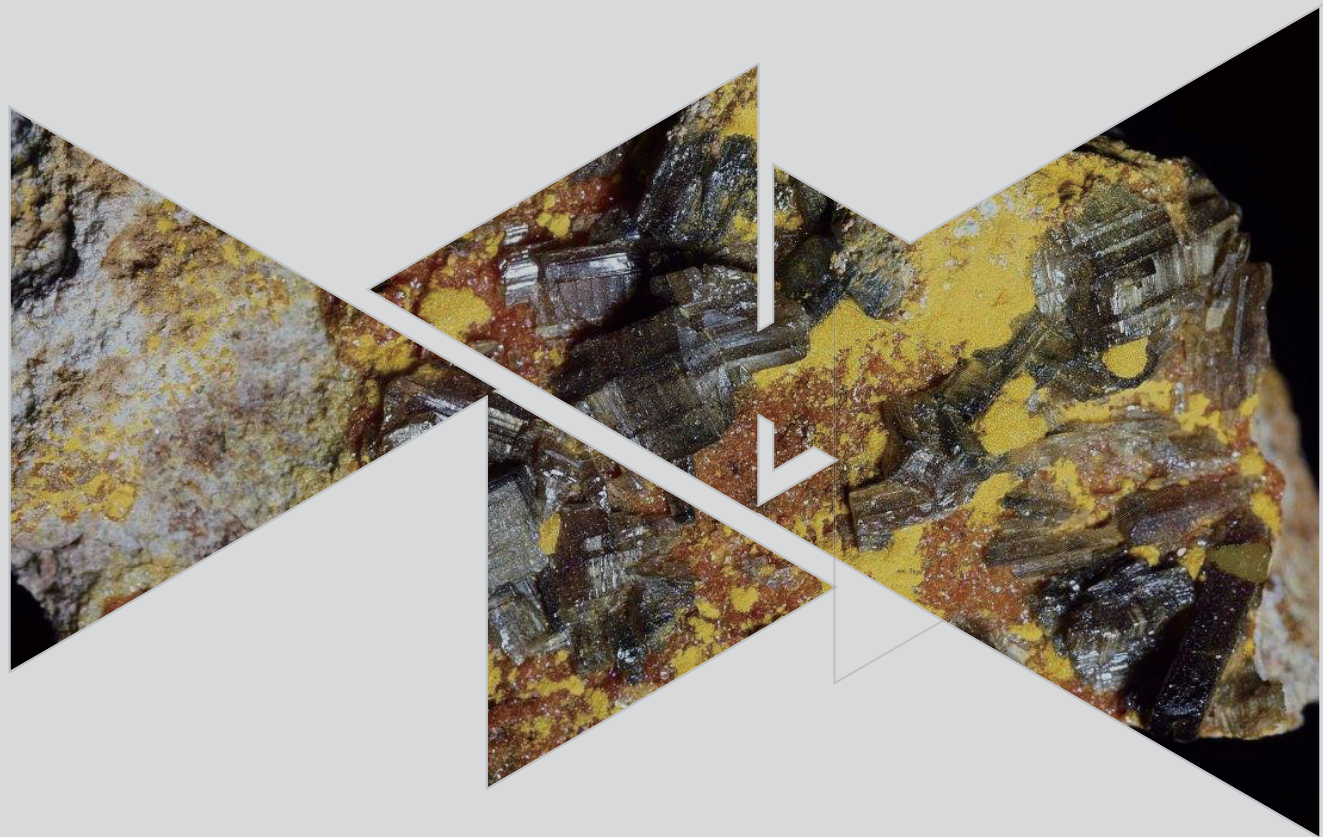


中国典型铀矿床 岩石物性特征

邓居智 陈辉 等 编著



科学出版社

中国典型铀矿床 岩石物性特征

邓居智 陈 辉 等 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书在系统介绍岩矿石标本物性参数测定,以及数据统计和图示方法的基础上,基于作者近年开展深部铀资源勘查的岩石标本物性测量数据,分别总结了江西省相山火山岩型铀矿田、广东省下庄花岗岩型铀矿田及陕西省商丹伟晶花岗岩型铀矿床典型岩石的密度、磁化率、电阻率及极化率等物性参数特征,并进行了多参数交互分析。为便于读者使用,书中以附录的形式给出了3个矿区岩矿石标本物性测量的原始数据。

本书是我国首部系统总结铀矿床岩石物性特征的专著,书中数据对我国硬岩型铀矿勘探具有重要的参考价值。本书可作为地质资源与地质工程、地球物理学等相关专业的教学参考书,也可供高等院校师生、科研单位的研究人员及生产单位的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国典型铀矿床岩石物性特征 / 邓居智等编著. —北京:科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-060301-2

I. ①中… II. ①邓… III. ①铀矿床-岩石物理性质-研究-中国
IV. ①P619.140.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第297472号

责任编辑:张井飞 白丹 / 责任校对:张小霞
责任印制:肖兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京画中画印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年5月第一次印刷 印张:10 3/4

字数:211 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国铀矿找矿工作始于 1955 年，已经找到了多种类型的铀矿床，探明了数量可观的铀矿资源储量，为中国核军工和民用核电的发展提供了很好的铀资源保障。在铀矿找矿的 60 多年进程中，放射性勘查方法是我国应用最早、最为广泛的一种地球物理方法，目前，90% 以上已发现的铀矿床都是通过放射性勘查方法发现的。但是，随着找矿目标埋藏深度的不断变深，地下地质环境、构造等的复杂程度的加大，传统的放射性地球物理方法对深部铀矿体的探测能力有限，其在铀矿找矿工作中的作用逐渐减弱。

自 20 世纪 90 年代末期开始，除放射性地球物理方法以外，重力、磁法、浅层地震、电法、电磁法等普通地球物理方法开始应用于我国深部铀矿找矿中，但除地面重力和高精度磁力测量以外，大部分普通地球物理勘探均布设剖面性工作，较少开展岩矿石物性（密度、磁性、电性、弹性、放射性）测量。与此同时，和其他金属矿勘探不同，铀矿勘探大多仅做放射性测井工作，很少开展综合测井工作，这使得我国典型铀矿田（床）的岩矿石的物性资料缺乏。而岩矿石的物性差异是地球物理勘探的基础，岩矿石的物性也是联系地球物理和地质的纽带，全面的物性资料是对地球物理探测结果进行可靠地质解释的基础。同时，随着深部铀矿地球物理勘探的难度增大，以及地球物理方法研究的深入，对岩矿石的物理性质研究，特别是对接近自然赋存状态下的岩石物性研究具有重要意义。

基于我国铀矿田岩矿石物性资料不够全面的现状，以及物性资料对我国铀矿深部找矿突破的重要性和紧迫性，作者很早就酝酿这本书，早期苦于没有系统的原始资料，未能完成，幸运的是，近年来，作者在铀矿找矿领域承担了国家自然科学基金、国家核能开发、中国地质调查局及中陕核集团科技项目等项目，对我国江西相山火山岩型铀矿田、广东下庄花岗岩型铀矿田及陕西商州-丹凤-商南地区（简称商丹）的伟晶花岗岩型铀矿床开展了系统的岩石物性调查研究，获取了大量的物性测量原始数据，总结了上述 3 个铀矿田（床）典型岩石（地层）的密度、磁性、电性、弹性等物性特征，力图我国的铀矿找矿提供基础数据资料和参考。

常用的岩矿石物性参数获取方法有标本测定法、野外露头观测法、物理场观测反演计算法、井中观测法 4 种。其中，标本测定法是较直接、易控制、精度较高、单解的物性数据获得方法，因此，本书的物性数据主要来源于标本测定法。

全书共分 4 章，第 1 章介绍了岩矿石密度、磁性、电性和波速等参数测量中标本采集及处理、基本方法及数据统计和图示。第 2 章介绍了我国最大的相山火

山岩型铀矿床的地质概况、物性测试概述，以及重点分析了相山铀矿田的典型地质单元的密度、磁化率、电阻率、极化率等物性特征和它们与深度的关系。第3章介绍了我国最大的下庄花岗岩型铀矿床的地质概况、物性测试概述，以及重点分析了下庄铀矿田的典型岩体的密度、磁化率、电阻率、极化率等物性特征及它们之间的关系。第4章介绍了我国新型的陕西商丹伟晶花岗岩型铀矿床的地质概况、物性测试概述，以及重点分析了光石沟、小花盆、纸房沟及高山寺4个重点工作区典型岩体的密度、磁化率、电阻率等物性特征。为便于读者查阅，书后附了部分物性测量的原始数据。

本书由邓居智、陈辉完成，李红星、谢尚平、王彦国、蒋才洋参与了大量的测试工作和部分章节撰写工作。此外，博士研究生余辉，硕士研究生郭猛、孟小杰、祝福荣、周彪华、蓝泽鸾、蒋亮、李磊、尹敏、张磊、邱姜欣、丁文伟、许文军、赵航、黄贤阳、刘星、覃田赐等，也参与了野外标本采集、物性测试及图件绘制工作。正如前文所述，本书是作者及团队多个项目的研究成果，还有很多老师、研究生和本科生参加岩石标本采集和测试工作，在此一并深表谢意，特别感谢长期从事放射性地球物理教学与科研的刘成教授对本书的鼓励和支持。本书的出版得到了国家自然科学基金（41674077，41404057，41604104）、国家核能开发项目（科工技2013〔969〕号），以及地质资源与地质工程江西省一流学科的资助。

作 者

2018年5月于东华理工大学

目 录

前言

第 1 章 岩石物性测定和统计方法	1
1.1 岩矿石密度的测定	1
1.2 岩矿石磁性的测定	5
1.3 岩矿石电性参数的测定	11
1.4 岩矿石波速的测定	17
1.5 岩矿石标本物性参数统计及图示	19
第 2 章 相山火山岩型铀矿田物性特征	24
2.1 相山火山岩型铀矿田概述	24
2.2 岩矿石物性测量	33
2.3 典型岩石的物性特征	35
2.4 典型地层物性特征	49
第 3 章 下庄花岗岩型铀矿田物性特征	52
3.1 下庄花岗岩型铀矿田概况	52
3.2 岩矿石标本的采集与物性测量	58
3.3 岩矿石物性特征	59
3.4 岩石物性参数交会分析	73
3.5 岩石物性特征总结	76
第 4 章 陕西商丹伟晶花岗岩型铀矿床物性特征	77
4.1 陕西商丹伟晶花岗岩型铀矿床概况	77
4.2 岩矿石标本物性测量	81
4.3 岩矿石物性特征	81
4.4 商丹地区岩矿石物性特征	86
附录一 岩矿石物性标本采集及测量记录表	87
附录二 江西相山铀矿田岩石标本物性测量数据	90
附录三 广东下庄花岗岩型铀矿田岩石物性测量数据表	138
附录四 陕西商州-丹凤-商南地区铀矿床物性测量数据表	150
主要参考文献	164

第 1 章 岩石物性测定和统计方法

物性是联系地球物理和地质的纽带，扎实的物性资料是可靠地质解释的基础。岩矿石物性参数主要有密度、磁性、电性、波速、放射性、光谱学性质参数，以及孔隙度、渗透率等物质结构性质参数等。其中，密度、磁性、电性、波速参数分别对应的物探方法是重力勘探、磁法勘探、电法勘探、地震勘探。物性调查中获取岩矿石物性参数的方法有标本测定法、野外露头观测法、物理场观测反演计算法、井中观测法 4 种。其中，标本测定法是较直接、易控制、精度较高、单解的物性数据获得方法。据此，本章在参照《岩矿石物性调查技术规程》(DD 2006-03)，并查阅相关资料的基础上，结合近年来关于岩石标本物性测定方面的研究，简要介绍岩石标本的密度、磁性、电性、波速参数的测量和数据统计方法。

1.1 岩矿石密度的测定

岩矿石的密度是指单位体积物质的质量，其单位为 g/cm^3 或 kg/m^3 。地下不同地质体之间存在的密度差异是开展重力勘探工作的地球物理前提条件，地质体的密度也是对重力测量结果进行地形校正和中间层校正，以及重力异常的正演计算、反演解释的重要参数。因此，对岩石密度的测定及对测定结果的分析研究是重力勘探工作的一个重要内容。

1.1.1 标本采集与处理

要了解某一研究区典型岩石的密度特征，应系统采集研究区内不同地层单元及不同岩性的标本，通过直接测定岩石标本的密度大小来确定它们所代表的岩性的密度，或确定它们之间的密度差。岩石标本采集应遵循以下原则。

1) 对于分布范围较广的较厚岩层、重点勘探对象及围岩要适当采集更多的标本，而对于薄层、与勘探目的关系不大的岩石可以少采集标本；在岩性变化较大的地段应多采集标本，在岩性变化不大的地段可以少采集标本。

2) 采集标本时，既要采集浅部的，又要尽量采集深部的。因为浅部密度资料可以在中间层和地形校正时使用，而深部密度资料要用于重力异常的地质解释。

3) 每类标本的数量一般为 30 ~ 50 块，每块标本质量为 300g 左右为宜。

4) 对所采集的标本应及时登记、编号，并注明地点、名称、地质年代及深

度等。

5) 应考虑其他物性参数测定的要求, 如形状、规格和大小, 尽量发挥所采集标本的综合利用价值。

1.1.2 天平测定法

若标本质量用 m 表示, 它的体积为 V 时, 其密度 σ 可用下式计算:

$$\sigma = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

标本的体积可根据阿基米德原理确定, 即物体在水中减轻的重量等于它排开同体积水的重量, 于是可以间接求出标本体积 V 。

设标本在空气中的重量为 P_1 , 在水中的重量为 P_2 , v 为标本排开水的体积, σ_0 为净水的密度时, 得

$$P_1 - P_2 = V\sigma_0g \quad (1-2)$$

当温度为 4°C 时, 净水的密度为 $\sigma_0 = 1\text{g}/\text{cm}^3$, 式 (1-2) 可变为

$$V = \frac{P_1 - P_2}{\sigma_0g} \quad (1-3)$$

将式 (1-3) 代入式 (1-1), 并已知 $P_1 = mg$, 可得

$$\sigma = \frac{m}{\frac{P_1 - P_2}{\sigma_0g}} = \frac{mg}{P_1 - P_2} \sigma_0 = \frac{P_1}{P_1 - P_2} \sigma_0 \quad (1-4)$$

为此, 只要先求出标本 P_1 、 P_2 的重量, 然后可由式 (1-4) 计算出其密度 σ 。

用天平法测定的密度精度取决于 P_1 、 P_2 的测定精度。由误差传递理论可知, 密度 σ 的最大绝对误差可由下式计算:

$$\varepsilon_\sigma = \frac{(P_1 - P_2)\varepsilon_{P_1} + P_1(\varepsilon_{P_1} + \varepsilon_{P_2})}{(P_1 - P_2)^2} \quad (1-5)$$

式中, ε_σ 为密度的测定误差; ε_{P_1} 和 ε_{P_2} 分别为 P_1 和 P_2 的测定误差。对于同一天平称量的结果, 可以认为 $\varepsilon_{P_1} = \varepsilon_{P_2}$ 。设 $\varepsilon_{P_1} = \varepsilon_{P_2} = \varepsilon_P$ 时, 式 (1-5) 除以式 (1-4) 可得

$$\frac{\varepsilon_\sigma}{\sigma} = \frac{\varepsilon_P}{P_1} + \frac{2\varepsilon_P}{P_1 - P_2} \quad (1-6)$$

因为 $P_1 - P_2 = P_1/\sigma$, 所以式 (1-6) 变为

$$\frac{\varepsilon_\sigma}{\sigma} = \frac{\varepsilon_P}{P_1} + \frac{2\sigma\varepsilon_P}{P_1} = (2\sigma + 1) \frac{\varepsilon_P}{P_1} \quad (1-7)$$

即

$$\varepsilon_\sigma = \sigma(2\sigma + 1) \frac{\varepsilon_P}{P_1} \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可知, 天平法测定 ε_σ 不仅取决于 ε_p , 同时还与 P_1 和 σ 的大小有关。在标本的重量相同、称重的精度也相同的情况下, 密度越大的标本, 则测定的误差越大。若想减小误差, 虽然可选重量较大的标本来测定, 但实际工作中称重量大的天平精度又不高。因此, 标本质量既不能太小 (轻), 也不能太大 (重), 一般取 300g 左右为宜。密度较高的标本的质量可适当大些。对于多孔的标本, 为了防止水分浸入孔隙而影响测定结果, 可在标本表面涂一层石蜡。这时, 涂石蜡后的标本重量用 P_2 表示, 浸入水后的重量用 P_3 表示, 则由式 (1-4) 可得

$$\sigma = \frac{P_1}{\frac{1}{\sigma_0}(P_2 - P_3) - \frac{1}{\sigma_k}(P_2 - P_1)} \quad (1-9)$$

式中, σ_0 为水的密度; σ_k 为石蜡密度, 一般石蜡密度取 $\sigma_k = 0.9 \text{ g/cm}^3$ 。

1.1.3 密度仪测定法

虽然天平测定法能测定出标本密度, 但该方法操作费时, 且不是直接显示密度值, 还需要计算, 所以效率很低。为此, 已经开发了能够直接测定密度的仪器, 称为密度仪, 分为机械式密度仪和电子式密度仪。

1. 机械式密度仪

机械式密度仪是由苏联的萨姆索诺夫设计的, 所以又称萨姆索诺夫密度仪。密度仪是在天平原理上发展起来的仪器, 它的构造如图 1-1 所示。仪器的主要零件是一个折式秤臂 AOB , AO 和 BO 分别为两个长度均为 r 的左右臂, 其折角为 $180^\circ - \varphi$ 。秤臂中间装有一个指针, 秤臂的重心可集中在转轴 O 点上, 工作时需要事先调节装置, 使它处于平衡状态。密度仪还配有一个度盘, 度盘上标有密度刻度, 度盘右边标有固定标志线, 并用 n 表示, 它是指标本在空气中平衡时指针应在的位置。

在测定密度时, 先将标本用可以忽略其质量的细线悬挂在秤臂 B 端, 调节 A 端悬挂的砝码的质量, 使指针与刻度 n 重合, 见图 1-1 (a)。这时, AO 与水平面夹角为 α_1 , A 端砝码重量为 P , 而 B 端标本重量用 P_1 表示。其平衡关系式为

$$P \cdot r \cos \alpha_1 = P_1 \cdot r \cos(\varphi - \alpha_1) \quad (1-10)$$

当标本浸没在水中时 [图 1-1 (b)], 由于标本受到水的浮力, B 端升高并达到新的平衡位置。这时 AO 与水平线的夹角用 α_2 表示, 则平衡关系式为

$$P \cdot r \cos \alpha_2 = P_2 \cdot r \cos(\varphi - \alpha_2) \quad (1-11)$$

式中, P_2 为标本在水中的重量。由式 (1-10)、式 (1-11) 可求出 P_1 、 P_2 的表达式, 并将它们代入式 (1-4), 简化后的密度表达式为

$$\sigma = \frac{\cot \varphi + \tan \alpha_2}{\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1} \quad (1-12)$$

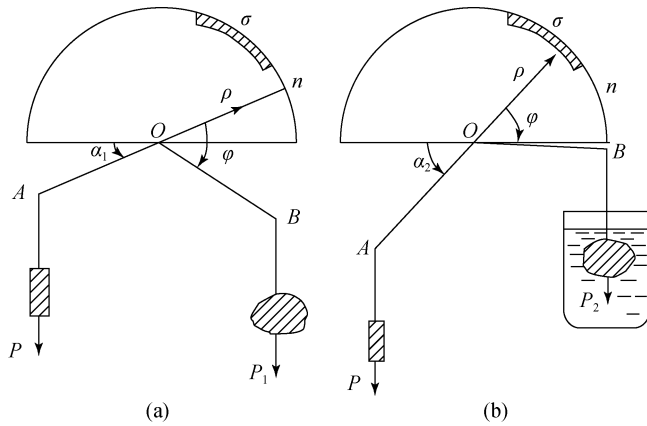


图 1-1 机械式密度仪构造图 (曾华霖, 2005)

由式 (1-12) 可得出 α_2 与 σ 的对应关系式为

$$\alpha_2 = \arctan \frac{\cot\varphi + \sigma \tan\alpha_1}{\sigma - 1} \tag{1-13}$$

由式 (1-11) 可见, α_2 与标本重量无关; 当 φ 为仪器构造常数, 并调节砝码重量使指针与固定标志 n 重合时, 即保持 α_1 为常数, 这时密度 σ 只与 α_2 有单一对应关系。根据不同的角度 α_2 在度盘上所对应的密度值 σ , 即可测出标本的密度。利用机械式密度仪测定的密度精度可达 $0.01 \sim 0.02\text{g}/\text{cm}^3$, 其测量效率比天平高 3~4 倍。

2. 电子式密度仪

电子式密度仪又称电子比重计, 是将现代微电子技术与阿基米德原理相结合而研发出来的新型密度测试仪器。该仪器采用先进称重传感器、单片机技术及嵌入式操作系统编程, 实现岩矿石标本密度自动测量。该仪器具有检测精度高、测量速度快、无须人工记录检测结果等优点 (李永涛和陶喜林, 2009)。其主要原理为利用传感器称出岩矿石标本在空中的质量 P_1 和在水中的质量 P_2 、将其转换为电压信号, 经放大、A/D 转换后, 送单片机系统进行处理, 得到岩矿石密度值, 然后由计算器或者内部存储设备进行存储。该仪器改变了传统密度测试的烦琐操作, 实现了不规则标本的快速准确测量, 同时能满足现代产品生产及新材料研究过程中对标本密度的精确测量要求。电子式密度仪组成如图 1-2 所示。

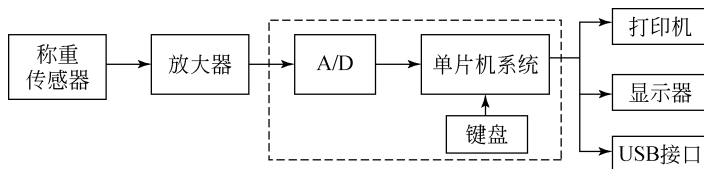


图 1-2 电子式密度仪组成框图 (王锐等, 2006)

1.2 岩矿石磁性的测定

地壳浅部的岩石和矿石，从它们形成时起，其就被地磁场所磁化。岩石和矿石被地磁场磁化的原理和物质的磁化是一样的。所不同的是地磁场对岩矿石的磁化是长期的，在磁化过程中岩矿石又可能经历了各种变化，其磁性变得更复杂。岩矿石的磁性常用磁化率、感应磁化强度及剩余磁化强度表示。

岩矿石被现代地磁场磁化而具有的感应磁化强度可表示为

$$J_i = \kappa T \quad (1-14)$$

式中， T 为地磁场总强度； J_i 为感应磁化强度，用以表示岩矿石被磁化的程度； κ 为岩矿石的磁化率，用以表示物质被磁化的难易程度，其值取决于岩矿石的性质。磁化率 κ 无量纲。

影响岩矿石磁性的因素有很多，可分为内因和外因两个方面。内因有磁性矿物的成分、含量、颗粒大小、结构等；外因有磁化场、温度、应力等。岩矿石磁性与各种影响因素之间的关系是复杂的。

实验室中可以测定岩矿石磁化率 κ 及剩余磁化强度 J_r 的大小和方向。在古地磁研究中，还需要确定磁化强度的稳定性、居里点、饱和磁化强度及矫顽磁力。测量岩石磁性的方法主要有磁秤测量法、质子磁力仪测定法及磁化率仪感应法三种。

1.2.1 标本采集与处理

磁性标本可采自野外天然和人工露头、勘探工程场地和钻井的岩心等。采集标本的岩性种类根据磁测工作的需要确定。为了使磁性测定数据有代表性，标本应采自同一岩性的不同露头，在每一处露头上也应均匀分布。如果不是专门研究岩矿石风化物的磁性，标本都应尽量采自基岩。为了防止雷电影响岩石的天然剩余磁化强度，一般不在地形制高点采集标本。在钻井和勘探场地采集标本时，应将可能带有磁性物质的污染物（如泥浆铁屑、钻砂等）清洗干净。

采集的每种岩矿石标本数量应满足测定数据统计计算的要求。一般不能少于30块。踏勘时可适当减少，但不能少于14块。配合勘探的磁测工作可按地质体磁性变化情况适当增加采集标本的数量。标本应加工成等轴形状或立方体形状。磁性弱的标本的体积应为 1000cm^3 左右，磁性较强的标本的体积也不应低于 400cm^3 ，并留有切割加工的余地。

为了研究岩矿石剩余磁化强度的大小和方向，需要采集定向标本，也就是要确定标本在原露头上的空间位置。一般用三种定向标志来确定，即在采集标本的露头上画出两个方向上的水平线确定水平面，标出水平面的上、下方，确定其垂直轴，并在标本上标出磁北方向箭头，如图1-3所示。然后，设法取下标本并进

行编录登记。

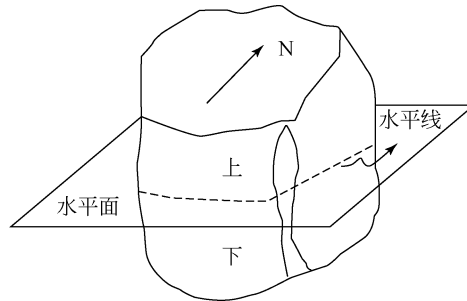


图 1-3 标本定向描述示意图

1.2.2 磁秤测量法

按标本相对于磁系不同的放置位置，可分为高斯第一位置和高斯第二位置两种方式进行磁性测定。前者适用于强磁性标本磁性参数测定，一般可测磁化强度大于 $1500 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 的岩矿石标本；后者适用于弱磁性标本，可测 $400 \times 10^{-3} \sim 500 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 的岩矿石标本。高斯第二位置测定时，因标本放置位置不同，又可分为两种测定方法，一种是磁秤高斯第二位置测定法，另一种是磁秤高斯第三位置测定法。

如果岩石标本是定向标本，则测定时将标本置于立方体标本盒中，两者中心要一致。标本上磁北方向为 x 轴正向， y 轴指东为正，标本的水平面与 xoy 平面平行，这时标本从上至下即 z 轴之正向。在盒内将标本固定好后即可测定，最后测出标本的体积 V ，进行计算。

1. 磁秤高斯第二位置测定法

高斯第二位置测定法是使标本中心处于磁系旋转轴的延长线上（即北或南），此时磁系中心处于标本受地磁场垂直分量 Z_0 磁化的某个垂直轴间偶极子的中垂线上，如图 1-4 所示。此时，磁系中心点的磁场为

$$Z_a = \frac{\mu_0 m_z}{4\pi R^3} \quad (1-15)$$

式中， m_z 为标本总磁矩 M 在 z 轴方向上的投影分量，应有

$$m_z = (M_{iz} + M_{rz}) \cdot V \quad (1-16)$$

假定未放标本时仪器读数为 n_0 ，置入标本 z 轴正向时读数为 n_5 ；标本绕 y 轴（即固定一个轴的方向）旋转 180° 后，反向读数为 n_6 ，则有

$$\varepsilon(n_0 - n_5) \cdot 10^{-9} = \frac{\mu_0 (M_{iz} + M_{rz}) \cdot V}{4\pi R^3}$$

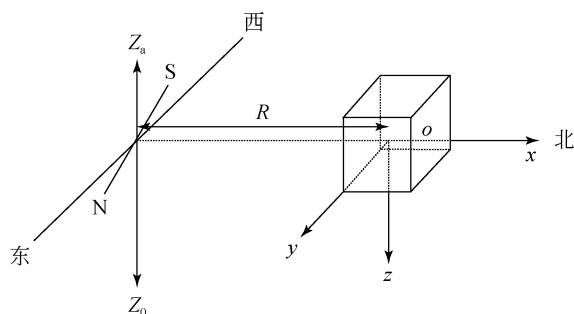


图1-4 磁秤高斯第二位置测定法 (管志宁, 2005)

$$\varepsilon(n_0 - n_6) \cdot 10^{-9} = \frac{\mu_0(M_{iz} + M_{rz}) \cdot V}{4\pi R^3} \quad (1-17)$$

解上述两式, 便可分别求得 M_{rz} 和 M_{iz} , 而 $M_{iz} = \kappa'_z \cdot Z_0/\mu_0$ 。所以有

$$\kappa'_z = \frac{\varepsilon\left(n_0 - \frac{n_5 + n_6}{2}\right) \cdot 4\pi R^3 \cdot 10^{-9}}{Z_0 V}$$

$$M_{rz} = \frac{\varepsilon\left(\frac{n_6 - n_5}{2}\right) \cdot 4\pi R^3 \cdot 10^{-9}}{\mu_0 V} \quad (1-18)$$

同样, 分别在 x 和 y 轴测定时, 正、反向读数为 n_1, n_2 和 n_3, n_4 。取以上读数分别替代上述两式中的读数项, 便可得相应的 κ'_x, M_{rx} 和 κ'_y, M_{ry} 。于是可求得平均视磁化率 κ' 、剩余磁化强度 M_r 、方位角 φ (与磁北的夹角) 和倾角 θ :

$$\kappa' = \frac{1}{3}(k'_z + k'_y + k'_x), \quad M_r = (M_{rx}^2 + M_{ry}^2 + M_{rz}^2)^{1/2}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{M_{ry}}{M_{rx}}\right), \quad \theta = \arctan\left(\frac{M_{rz}}{(M_{rx}^2 + M_{ry}^2)^{1/2}}\right) \quad (1-19)$$

若在测定过程中能保持标本中心至磁系中心距离 R 不变, 则以上公式可直接与读数联系起来简化计算, 有

$$\kappa' = \frac{2\pi R^3}{3Z_0 V} \varepsilon [6n_0 - (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5 + n_6)] \cdot 10^{-9}$$

$$M_r = \frac{2\pi R^3}{\mu_0 V} \varepsilon [(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2 + (n_6 - n_5)^2]^{1/2} \cdot 10^{-9} \quad (1-20)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{n_4 - n_3}{n_2 - n_1}\right), \quad \theta = \arctan\left[\frac{n_6 - n_5}{[(n_2 - n_1)^2 + (n_4 - n_3)^2]^{1/2}}\right]$$

2. 磁秤高斯第三位置测定法

磁秤高斯第三位置测定法与磁秤高斯第二位置测定法原理完全一样, 只是将磁系旋转了一个方位角, 使 N 极指南。这时由于地磁场水平分量 H_0 的作用, 仪器

灵敏度提高，所以可测定磁性更弱的标本的磁性参数。计算公式仍用式 (1-20)，但仪器的格值 (ε) 需要在测定标本时利用仪器磁系所在方位测得的格值常数来计算。

由上述计算公式可知，磁秤高斯第二位置测定法和磁秤高斯第三位置测定法测定标本读数必须满足以下条件，即

$$\frac{n_1 + n_2}{2} \leq n_0, \quad \frac{n_3 + n_4}{2} \leq n_0, \quad \frac{n_5 + n_6}{2} \leq n_0 \quad (1-21)$$

磁秤高斯第一位置测定法是将标本中心置于磁系中心正下方，如图 1-5 所示。

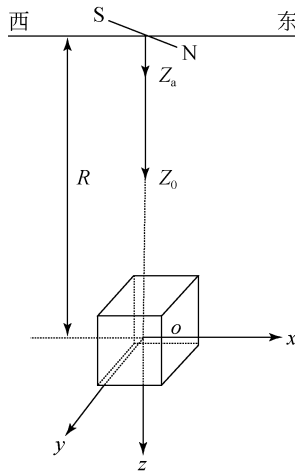


图 1-5 磁秤高斯第一位置测定法 (管志宁, 2005)

1.2.3 质子磁力仪测定法

质子磁力仪测定法的优点是不需要专用的磁性测定仪器，只需要利用地面磁法测量的高精度质子磁力仪，可进行 $\kappa > 50 \times 4\pi \times 10^{-6}$ 的标本的磁性测量，这类质子磁力仪包括 MP-4、OMNI-4、G-856AX、ENVI 或其他型号微机质子磁力仪。

在标本测试前，首先选择一处磁场较平稳且无人文干扰磁场的地点，架好仪器及探头，此时梯度读数 T_n 应在零值左右 (或有很小底数)。然后将岩矿石标本放入标本盒内，放置于标本架上，如图 1-6 所示。该标本架用脚架作支撑，其上放置两块活动的 (带无磁合页) 平板，一块水平放置并固定在架上，另一块倾斜可调，使交角与当地磁倾角相等，并使倾向朝北，置于下探头北侧，板上装有角铝，以防标本盒下滑。探头轴向置于南北方向，标本盒放在一个无磁性合页板的倾斜板面上，倾斜板面的倾角应与当地地磁倾角 I_0 一致。倾斜面朝北，置于探头轴向两侧——东或西，使标本盒中心与下探头的中心在同一水平面上。显然，

此装置类似于高斯第二位置测定法，但标本测量轴受地磁场 T_0 磁化。靠近标本的探头测量正常场和标本叠加的磁场，而远离标本的探头测量正常场，则放置标本时的梯度读数 (T_H) 即标本所产生的磁场。若采用单探头的总场测量装置，则必须在附近另设一台测日变的同类仪器，将每次读数进行日变改正后才能算出标本产生的磁场。

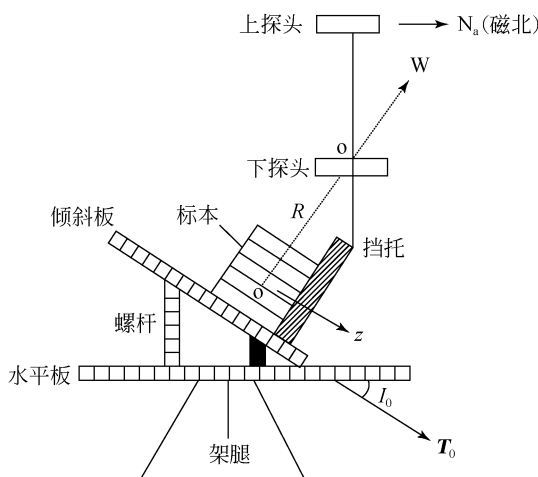


图 1-6 质子磁力仪测定标本磁性装置图 (管志宁, 2005)

设未放标本前读数为 n_0 ，放标本后， z 轴正向顺着 T_0 方向时梯度读数为 n_1 ，而 z 轴正向逆着 T_0 方向时读数为 n_2 ，则有

$$n_1 \cdot 10^{-9} = \frac{\mu_0 (M_{iz} + M_{rz}) V}{4\pi R^3}, \quad n_2 \cdot 10^{-9} = \frac{\mu_0 (M_{iz} - M_{rz}) V}{4\pi R^3} \quad (1-22)$$

由以上两式可以解出磁化率和磁化强度，并考虑 $M_{iz} = \kappa'_z (T_0/\mu_0)$ ，则

$$\kappa'_z = \frac{4\pi R^3 \cdot 10^{-9} \left(\frac{n_1 + n_2}{2} \right)}{T_0 V}, \quad M_{rz} = \frac{4\pi R^3 \cdot 10^{-9} \left(\frac{n_1 - n_2}{2} \right)}{\mu_0 V} \quad (1-23)$$

测定时，利用测量仪器的点/线设置功能设置标本磁性测量编号，如 z 轴正向取为 5，绕 z 轴（即 T_0 方向）每旋转 90° 记录一个数，编号分别为 501、502、503、504，其余轴向号码一样编入。百位上的数表示某个轴的正、反向读数，个位上的数表示该轴向的 4 次读数，也就是采用 24 次读数法，目的是减小标本形状不规则、磁性不均匀和标本位置误差的影响，所以取 4 次读数的平均值来代表该轴向读数，如：

$$\bar{n}_1 = \frac{T_{H501} + T_{H502} + T_{H503} + T_{H504}}{4} \quad (1-24)$$

依次可以读得：放入标本后读数为 \bar{n}_1 、 \bar{n}_2 、 \bar{n}_3 、 \bar{n}_4 、 \bar{n}_5 、 \bar{n}_6 。即可按下述公式计算参数：

$$\kappa' = \frac{2\pi R^3}{3T_0 V} [|\bar{n}_1 + \bar{n}_2| + |\bar{n}_3 + \bar{n}_4| + |\bar{n}_5 + \bar{n}_6|] \times 10^{-9}$$

$$M_r = \frac{2\pi R^3}{\mu_0 V} [(\bar{n}_2 - \bar{n}_1)^2 + (\bar{n}_4 - \bar{n}_3)^2 + (\bar{n}_6 - \bar{n}_5)^2]^{1/2} \times 10^{-9} \quad (1-25)$$

计算方位角 (φ) 和倾角 (θ) 的公式同式 (1-18)。为了使所测数据可靠, 希望标本产生的磁场 $\geq 1\text{nT/m}$, 可通过调节 R 来实现。

也可以采用磁秤高斯第一位置测定法测定岩矿石标本的磁性参数, 即把标本置于探头轴向的北侧, 并在倾角为 I_0 的倾斜板上放置标本后, 使通过标本中心的 z 轴 (平行 T_0 方向) 的延长线交于下探头中心。此时的 R 为沿 T_0 方向的斜距, 可应用磁秤高斯第一位置公式计算 κ' 和 M_r 。

标本的体积 V 可以采用排水法进行测量, 误差应控制在 5cm^3 以内, R 可以用皮尺进行测量, 误差应控制在 0.2cm 以内。测量过程中, 仪器探头附近的磁性干扰物, 如强磁性标本、铁筒、标本架、探头支撑杆等均不得移动。在一块标本测定期间, n_0 应保持不变。

通过以上方法测得的磁化率均为视磁化率, 可利用近似球体标本的计算公式求得真磁化率 κ , 即

$$\kappa = \frac{\kappa'}{1 - \frac{1}{3}\kappa'} \quad (1-26)$$

1.2.4 磁化率仪感应法

磁化率仪感应法测量的是标本感应的电动势, 用这种方法测得的电动势与标本的磁矩及旋转频率成正比。另一种方法是把标本放在通有电流的线圈中, 由于磁感应通量的变化而产生附加电动势, 这个变化与岩石磁化率成反比。感应法的第一种测量方法可以测定岩石的剩余磁化强度和磁化率, 第二种测量方法只能用来测定磁化率。

旋转磁力仪就是将标本绕某个轴匀速转动, 将感应线圈作为探头, 测定该标本磁场所产生的电动势的振幅与相位 (万明浩, 1994)。测定时一般在标本上适当选择一直角坐标系, 使标本分别绕 3 个坐标轴旋转。当标本绕 z 轴旋转时, 可测得标本总磁矩 M 在 xy 平面上的投影 M_{xy} 的大小及与 x 轴的夹角 φ_{xy} , 同样当标本绕 x 、 y 轴旋转时, 则可分别测得 M_{yz} 与 M_{zx} , φ_{yz} 与 φ_{zx} , 整理得

$$M_r = \sqrt{\frac{M_{xy}^2 + M_{yz}^2 + M_{zx}^2}{2}} \quad (1-27)$$

$$J_r = \frac{M}{V} = \frac{1}{\sqrt{2}V} (M_{xy}^2 + M_{yz}^2 + M_{zx}^2)^{1/2} \quad (1-28)$$

由测得的相位角可计算 J_r 的偏角和倾角。

利用磁化率仪测定岩矿石标本磁性时,将标本放在通有电流的线圈旁,由于磁感应通量的变化而产生附加电动势,从而测定岩矿石的磁化率。虽然磁化率仪只能测定岩矿石的磁化率,但该方法快速方便,因而应用较广。

标本磁化率测量步骤如下。

1) 选择一个没有强磁干扰体的标本测量点,每天测量之前,使用磁性标准样进行仪器调试、校正,用多台测试进行横向比对。

2) 测试时仪器紧靠标本,分别对岩石标本的上、下、左、右4个方向进行测量。

3) 测量时先测量标本,再测量本底,从仪器上直接读出岩矿石标本磁化率的大小。

4) 读数记录在班报记录纸上,按照要求做不少于标本10%的检查点,计算出平均相对误差,保证测量误差均在误差允许的范围之内。

1.3 岩矿石电性参数的测定

岩矿石电性特性是电法勘探方法设计和资料解释的依据,它贯穿于电法勘探工作的始终,从方法设计、工作布置到异常定性和定量解释。岩矿石的电性参数主要包括电阻率、介电常数、自然极化和激发极化特性及压电效应等,其中电阻率和极化率是常用电性参数。

1.3.1 标本采集与处理

岩矿石电性测量标本可与密度、磁化率测量标本共用,采集标本时也应详细的标本采集记录,标本的采集位置应尽量投影到地质图或地球物理实际材料图上,以供异常解释时参考。

电性测量的岩矿石标本一般也有两种来源,一是从野外露头获取,二是钻孔岩心。从野外获取的标本不规则,表面不平整,为了精确得到标本的电性参数,必须对标本进行加工处理,一般将标本加工成正方体或者长方体,以两个对称的面为标本测试的接触面(S), S 边长控制在 $3\sim 5\text{cm}$ 。两个面之间的距离为 L , L 以小于 10cm 为宜。钻孔岩心标本为圆柱状,若上下底面不平整,必须将其切割成平整面,圆柱长度也宜小于 10cm 。在岩矿石标本的加工过程中,必须保证标本能代表岩矿石的固有性质。

加工好的标本放在自来水中完全浸泡,松散标本在浸泡过程中容易破裂,不宜浸泡太久,轻拿轻放,不可堆积在一起,以免压坏,致密岩心标本一般浸泡 24h 。为避免表面电流的影响,经过浸泡后的标本要经过一段时间的自然风干,测试过程中,如果测试时间较长,还要注意标本的保湿,避免在同一次测试过程中由蒸发和与此有关的因素引起离子通道内的溶液发生矿化度变化,进而引起标