

The book cover features a light blue background with a fine grid pattern. Scattered across the cover are several stylized atomic symbols, each consisting of a central nucleus with three elliptical orbits. These symbols are rendered in a light blue color that matches the background's grid lines.

高等教育试用教材

# 核技术勘查

吴慧山 主编  
章 晔 审校

原子能出版社

ISBN 7-5022-1863-7



9 787502 218638 >

ISBN 7-5022-1863-7/P631.6 定价:32.00 元

高等教育试用教材

# 核 技 术 勘 查

|     |     |    |
|-----|-----|----|
| 吴慧山 |     | 主编 |
| 吴慧山 | 蒋永一 | 编著 |
| 唐声喤 | 赵树新 |    |
| 章 晔 |     | 审校 |

原子能出版社

北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

核技术勘查/吴慧山等编著. -北京:原子能出版社,1998.12

高等教育试用教材

ISBN 7-5022-1863-7

I. 核… II. 吴… III. 放射性勘探-测量 IV. P631.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 20224 号

## 内 容 简 介

本书较系统全面地阐述了核科学技术勘查,包括核地球物理勘查与核地球化学勘查(简称核物探与核化探)的基本内容。突出地介绍了编著者数十年来在氡气测量、航空 $\gamma$ 能谱测量、放射性平衡、反褶积、同位素方法、氦气测量、数据处理的数学保证、找矿模型和方法综合应用等方面的科研、教学和生产的经验,以及一些新的认识。全书共分五编,即核地球物理勘查的天然放射性测量,核地球物理勘查的人工放射性测量,核地球化学勘查,核技术勘查数据处理的数学保证和核技术勘查若干新思路与综合应用。

每种方法都不同程度地介绍了基础理论、技术方法、资料整理、异常解释和应用实例。

本书为核地球物理勘查与核地球化学勘查专业研究生教学用书,亦可供高等院校核物探与核化探专业的教师、高年级学生,以及水文地质、工程地质、地质勘查、环境评估、地震测报、物理和化学等专业的人员参考。

☆

☆

☆

本书经铀矿地质与采矿教材委员会于1994年3月由张锦由主持召开的审稿会审定作为高等教育试用教材。

©原子能出版社,1998

原子能出版社出版 发行

责任编辑:陈宏林

社址:北京市海淀区阜成路43号 邮政编码:100037

中国文联印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张:38.75 字数:992千字

1998年12月北京第1版 1998年12月北京第1次印刷

印数:1-500

定价:32.00元

## 前 言

编写《核技术勘查》一书的提纲是1988年在制定第三轮教材编审出版规划的教材委员会会议上确定的,并于1989年3月得到核工业总公司教育培训部正式批准(见核总教材发[1989]14号文)。1990年开始编写后不久,由于编著者中有的已退休,有的长期出国,难于承担编写,停了两年多。1993年初,在总公司院校教材处领导的关怀和催促下,根据专长,重新组织编著者。针对当前社会主义市场经济的需要,对原编写提纲进行了重要修改和补充。四位编著者经过近一年的努力,于1993年底全面完成书稿。

本书为核物探与核化探学科的研究生教学用书,亦可供相应专业的高等院校教师和高年级学生,以及从事环保、地震测报、地质等科研和生产部门的工程技术人员参考。

在编写本书过程中,编者除注意理论联系实际以及基础理论和基本概念的正确表达外,特别强调了“大专业、宽基础、多方向”的指导思想;注意了个人专长;强调了要尽量反映当代最新科学成就,以及本学科的前沿进展。

本书由五个部分组成:核物探的天然放射性测量、核物探的人工放射性测量、核化探、核技术勘查数据处理的数据保证和核技术勘查的若干新思路与综合应用。

本书实际上包括了以前的三门(放射性勘探、核地球物理勘探和核化探)专业课的内容。本书按对本专业研究生授课180~220学时进行编写。

本书的前言,绪论,第一编的第一、二、三、五、六、八、九、十、十一、十二、十三章,第二编,第三编的第一、二、三、四、五及第八章和附录,由吴慧山编写;第三编的第六、七章和第五编,由蒋永一编写;第一编的第七章和第四编由唐声喁编写;第一编的第四章由赵树新编写。最后由吴慧山统一定稿。

中国核工业总公司地质局赵廷业、中国地质大学(北京)程业勋和章晔(主审)、南京大学石玉春、成都理工学院梁锦华、华东地质学院张锦由(审稿会主持人)、中国核工业总公司教育培训部董昌玉和赵强参加了1994年3月的审稿会,并提出了宝贵意见,特此表示感谢。在此,我们也感谢那些被引用、参考的著作和材料的编著者们。

由于编著者水平所限,请批评指正。

编 著 者

1994年4月于北京

## 绪 论

核物探同非核物探即地球物理勘查有着密切的关系,因为都是通过研究场的变化规律来达到解决问题的目的;但从它的理论基础、研究目标和领域来看,它既是物探又超出了物探,这是因为它还可以在现场通过研究放射性核素的含量或比值来达到找矿和解决其他有关问题;与此同时,它既可研究天然核辐射场,又能研究人工核辐射场;它既研究电磁场,又研究放射性气体辐射场。核物探同化探也有着密切的关系,因为都可以通过研究核素的含量或比值的变化(分布、分配等)规律来达到包括铀矿在内的找矿和解决其他有关问题的目的。因此正如上述,核物探亦可以说是化探,但又超出了化探。这起码是由于下列三个原因所引起的:

第一,当前,科学已发展到很高的水平,各个学科在不同程度上都已相互渗透和相互交叉(这也是科学发展的重要标志,也可以说是科学发展的重要途径!),因此,核物探与物探的交叉、核物探与化探的交叉,正好说明科学的发展。

第二,分类欠妥和不明确导致的,例如,国内外都有一些学者专家,将公认标准的一些化探内容,如分散晕与分散流、铀量测量等方法、放射性核素在自然界的分布、放射性核素的地球化学性质,等等,连同核物探本身的理论基础、方法技术等一起,写在教科书中,并定名为“放射性勘探”,或“放射性勘探方法”(Г. Ф. Новиков, 1965, 1989; )。实际上这也是合理的,因为它没有说明是物探或化探,而且从内容上是包括了这两门学科的,但没有包括人工放射性测量部分是个缺陷。另外,由于大部分是物探人员在从事“放射性勘探”的工作,所以随着历史的发展,逐步地将这部分化探内容删减了,干脆就称“放射性物探”,实际上这也是对的,因为没有化探内容了;但是没有包括人工放射性测量部分,同样是个缺陷。

第三,历史的原因造成了历史的事实。放射性勘探或放射勘探方法,从总体上说应包括核物探与核化探,应该说是对的,但“勘探”二字翻译不妥。从地质工作角度而言,勘探是一个工作阶段,是普查工作之后的阶段;另外,将氡法、 $\gamma$ 法称为普查方法,而将 $\gamma$ 测井,辐射取样称勘探方法,也欠妥,这是因为,其一,这些方法可以在不同工作阶段交叉应用;其二,勘探方法同书名又是重复。再者,从俄文字母看,一个词是“поиски”,过去字典译成“普查”,而“разведка”则译成“勘探”,这也欠妥。科学院院士谢学锦对相应的英文字“prospecting”和“exploration”,有个合理的说法:其中exploration既有普查之意,也有勘探之意,所以应译成勘查为宜。这样,地球物理勘探也应译成地球物理勘查,而放射性勘探应是放射性勘查。但我们称之的放射性勘查或勘查方法,还有一个问题即没有将问题的实质说清楚。“勘查方法”同地质上工程的布置的勘查方法易引起误会,看样子,硬套也不行。1988年,在众多专家参加的一个审稿会上将其定名为“放射性方法勘查”,这样一来,这个词就更合理了,但没有包括人工放射性测量部分也还是个问题。

核物探内部本身,过去由于一些历史的原因,在叫法上也存在着问题,即“规定”测量天然放射性的内容为放射性勘探或放射性物探,而将测量人工放射性的内容,称为核地球物理勘探。实际上,这是个明显的不合理,因为都是研究放射性的,研究核的,研究核辐射场的,唯一区别就是一个测量天然放射性核素,而另一个则是测量人工放射性核素。上述的定名无法体现出来。我们认为比较正确的,应是这两部分测量合起来定名为核地球物理勘查(简称核物探)。这样一种叫法,无论是从国内,或从国外,自70年代以来,已基本上趋于统一了,当然也还存在

一些老的习惯性叫法。我们相信,随着时间的推移,这种老习惯叫法也会越来越少的。

顺便一提,国外个别的国家,还有称“物理勘探”的,因此,国内就有一些人,将物理勘探前面加上一个核字,用核物理勘探来代替核地球物理勘查,这是很不合适的。这是因为“地球”二字是包含着地质或地学的意义的,而“勘查”二字是包括着“寻找”、“猜测”、“推理”、“评价”之意的。这样,用比较通俗的但不很科学的说法是:用物理(或核物理)的理论和方技术去解决或寻找(或猜测、推理、评价)地学中的问题。例如核辐射技术用于辐照种子,这就不是核物探研究的内容,但它是核物理,或核技术的应用领域;而核辐射技术,用于中子测井,它解决地学问题和地质找矿任务,所以应是核物探研究的内容的。另外,从物理到地球物理有着自身的理论基础和研究目标。所以用“核物理勘探”这个词也是不妥的。

核地球化学勘查(简称核化探),目前,从理论上和方法上来说都是成熟的。这门地学上的分支学科早在本世纪 30 年代前后,同“放射性勘探”就已实际存在着,就是人们没有正式地提出来而已,因为当时在理论上和方法技术上确实还不够完善。50 年代以来,随着放射性核素在自然界(地球、星球和陨石等)的分布规律、放射性同位素和放射成因同位素研究的发展和成熟,它应该是作为地学中的一门正式分支学科而被提出来。我们这本书就有这样的意图,就是将核化探的有关理论和方技术,尽量系统地归纳和表现出来,以供世人参考和进一步完善充实。

核物探与核化探是在科学发展的过程中相互渗透和相互交叉中形成起来的,是个年轻的分支学科,是地学中的两位小兄弟。目前在基础理论上和反演解释上,尚不够完善。过去由于世界性的保密和从事人员相对少等原因,至今社会上对它们尚很陌生,了解甚少,甚至由此而产生一些偏见。实际上,这两门学科对找矿和解决地学有关问题,作用是大的,而且几十年来,在挣扎拼搏中已取得了不少的好成果,这是众所周知的。归纳起来,它们的主要用途有:

一、寻找包括铀矿在内的几乎所有矿种。这是因为放射性核素几乎同空气和水一样,到处都有,“无孔不入”。这些方法找铀是直接方法,而找其他矿种则是间接方法,其主要依据是:利用放射性核素同这些矿种的伴生关系,寻找这些非放射性矿种赋存的空间,例如断裂构造、蚀变带、盆地等。

例如用  $\gamma$  能谱法和氦法找金、油气、铜铅锌、稀土元素等;用中子法通过氟找 Li, Bi, F, Ti, V, Y, Zr, Nb, Mo, Sn, 镧族元素, Hf, Ta, W, Hg, U 等,中子活化法还可以在海底 300m 深一次分析  $^{45}\text{Se}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{114}\text{In}$ ,  $^{178}\text{Hf}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^9\text{Be}$  等 20 多种元素。X 射线荧光方法用于找 Cu, Ca, Fe, Zn, Cr, Ni, Mn, Sr, Mo, Sn, Sb, Ba, P, K, S, Ti, V, Au, Ag, W, Hg, U, Pb 等多种元素。

二、寻找和开发能源。铀是核电站的主要原料,核物探与核化探找铀是世人所公认的;煤是火力发电的主要原料,煤中经常含有放射性核素,而且这种含量是随着其劣质程度的增加而增高的。煤矿与其周围岩石有着明显的密度差异,因而用  $\gamma$ - $\gamma$  法等来探测,是个有效方法;水既是能源,又是人类生存的需要,农业、工业等都需要它。核物探与核化探寻找地下水资源(冷的和热的),主要是根据它们赋存的裂隙构造存在着相对偏高放射性核素;另外,随着水温度的上升,放射性气体将更多地沿着构造裂隙向上迁移至近地表。用氦法、 $\gamma$  法可有效地找到水资源,特别是在城市中找水,核物探有着得天独厚的优势;油气是重要的能源,用放射性方法找油气开始于 20 世纪 40 年代,效果显著。

三、预报地震。氦气、氡气和铀同位素比值法等是预报中近期地震的比较有效的方法。1966 年原苏联的塔什干地震和近年来我国一些地区的地震预报证明这些方法是有效的。

四、环境监测与评价。核爆炸散落物和三废的处理、环境监测和评价等,放射性测量是个重

要内容。环境问题 21 世纪将更为突出。

五、在工业上的应用。利用放射性惰性气体( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$  等)可研究固体物质的物理-化学性质(固相转化),如料位计、厚度计、密度计等。

六、在农业上的应用。湿度的测量等。

七、在地学上的应用。地质填图、寻找铀源、发现和绘制地壳现代地质动力过程等。

八、非铀矿山氡浓度增高对生物危害的研究。这是一个相当重要的世界性问题。

九、在水文地质与工程地质中的应用。寻找地下冷、热水资源、滑坡和泥石流的研究,公路质量的无损监测、水库漏水的测定等。

十、城市建设中的应用。

核技术勘查以它崭新的技术、轻便快速的方法、成本低以及解决问题宽、能现场出结果、确定核素含量,计算线储量等,为其主要特点。已引起了世人的广泛注意。

随着科学技术的发展和社会主义市场经济的深化,核技术勘查这门地学领域中的新分支学科,将在更广泛的领域发挥更大的作用。

核技术是本世纪发展起来的划时代的崭新技术。这样的一些新科学技术,特别是在 70 年代以来,被用来解决地球科学中的物探与化探领域的任务,以及其他更广泛的一些问题,因而人们就相应地称它们为核物探与核化探。随着这些学科理论基础和方法的不断完善和充实、应用效果的显著,以及发展的相互交叉和渗透,所以,参加 1994 年 3 月本书审稿会的专家、学者一致认为,现在应是将核物探与核化探合而为一,正式定名为“核技术勘查”的时候了! 由于它既是地球科学中的一门分支学科,而解决问题又超出了地学领域,使它负有新的使命,向更高峰发展! 这是核物探与核化探发展的新阶段,它标志着该学科不单是用于找铀矿,还可以找其他金属矿与非金属矿种,用于解决地学中一系列的问题,而且亦广泛地用于工业、农业、建筑业、医学和环境科学等领域。

# 目 录

## 前 言 绪 论

### 第一编 核地球物理勘查——天然放射性测量

|                                           |       |
|-------------------------------------------|-------|
| 第一章 核地球物理勘查引论 .....                       | (1)   |
| 第一节 核物探及其研究对象和分类 .....                    | (1)   |
| 第二节 核物探的发展简史和与其他学科的关系 .....               | (2)   |
| 第三节 核物探今后的发展趋势 .....                      | (3)   |
| 第二章 放射性若干基础 .....                         | (4)   |
| 第一节 原子核的基本性质 .....                        | (4)   |
| 第二节 放射性的几个基本问题 .....                      | (5)   |
| 第三节 核衰变及其能量 .....                         | (20)  |
| 第四节 射线与物质的相互作用 .....                      | (25)  |
| 第五节 核辐射测量单位及核辐射防护 .....                   | (60)  |
| 第六节 核探测器 .....                            | (65)  |
| 第三章 $\gamma$ 测量的基本问题和概念 .....             | (68)  |
| 第一节 关于 $\gamma$ 测量应用的若干问题 .....           | (68)  |
| 第二节 $\gamma$ 辐射场中不同形态辐射体的计算 .....         | (76)  |
| 第三节 $\gamma$ 射线的迁移 .....                  | (83)  |
| 第四节 核仪器标定概论 .....                         | (85)  |
| 第四章 航空 $\gamma$ 能谱测量 .....                | (87)  |
| 第一节 航空 $\gamma$ 能谱测量的理论基础 .....           | (87)  |
| 第二节 航空 $\gamma$ 能谱测量的工作方法和技术 .....        | (97)  |
| 第三节 航空 $\gamma$ 能谱测量及磁测数据的处理 .....        | (103) |
| 第四节 航空 $\gamma$ 能谱测量资料解释和应用 .....         | (107) |
| 第五节 航空 $\gamma$ 能谱测量的地面工作 .....           | (118) |
| 第五章 地面和水下 $\gamma$ 测量 辐射取样与编录 .....       | (120) |
| 第一节 徒步 $\gamma$ 能谱测量 .....                | (121) |
| 第二节 徒步 $\gamma$ 总量测量 .....                | (126) |
| 第三节 轻便 $\gamma$ 能谱仪和 $\gamma$ 辐射仪简介 ..... | (127) |
| 第四节 汽车 $\gamma$ 能谱测量 .....                | (131) |
| 第五节 浅孔和深孔 $\gamma$ 测量 .....               | (135) |
| 第六节 $\gamma$ 辐射取样 .....                   | (136) |
| 第七节 辐射编录 .....                            | (138) |
| 第八节 水下 $\gamma$ 测量 .....                  | (139) |
| 第六章 $\gamma$ 测井 .....                     | (146) |
| 第一节 $\gamma$ 测井的基本理论 .....                | (146) |

|      |                         |       |
|------|-------------------------|-------|
| 第二节  | $\gamma$ 测井的工作方法及其干扰因素  | (148) |
| 第三节  | $\gamma$ 测井异常曲线的解释方法    | (149) |
| 第四节  | $\gamma$ 能谱测井           | (152) |
| 第五节  | $\gamma$ 能谱测井的能谱稳定方法    | (154) |
| 第七章  | $\gamma$ 测井数据的分层解释      | (158) |
| 第一节  | 分层解释的基本理论               | (158) |
| 第二节  | 地质体的脉冲响应                | (160) |
| 第三节  | 特征参数 $\alpha$ 的测定       | (162) |
| 第四节  | 解释含量为负值的原因分析            | (163) |
| 第五节  | 应用实例                    | (163) |
| 第八章  | 放射性平衡的基本理论和应用           | (166) |
| 第一节  | 放射性平衡的物理定义              | (166) |
| 第二节  | 放射性平衡的地球化学描述            | (169) |
| 第三节  | 放射性平衡的某些特征              | (175) |
| 第四节  | 放射性平衡的新概念               | (177) |
| 第五节  | 放射性平衡的考虑及应用             | (179) |
| 第九章  | $\gamma$ 测量的若干应用        | (185) |
| 第一节  | 监测土壤水分                  | (185) |
| 第二节  | 测量煤的灰分                  | (185) |
| 第三节  | 宇宙射线料位计                 | (186) |
| 第四节  | $\gamma$ 物位计            | (187) |
| 第五节  | 测定密度的 $\gamma$ 方法及其若干用途 | (187) |
| 第十章  | 氡的性质和理论                 | (200) |
| 第一节  | 氡的发现与射气作用的概念            | (200) |
| 第二节  | 氡的性质                    | (201) |
| 第三节  | 天然物质 $\alpha$ 粒子的有关性质   | (204) |
| 第四节  | 氡射气作用理论                 | (206) |
| 第五节  | 氡的迁移问题                  | (211) |
| 第十一章 | 氡气测量的方法和技术              | (217) |
| 第一节  | 氡气测量的物理基础               | (217) |
| 第二节  | 氡气测量方法的分类               | (218) |
| 第三节  | 氡气测量的应用条件               | (219) |
| 第四节  | 氡气测量系统的标定               | (220) |
| 第五节  | 常规氡测量                   | (221) |
| 第六节  | 径迹蚀刻测量                  | (222) |
| 第七节  | 活性炭测量                   | (223) |
| 第八节  | 钋-210 测量                | (224) |
| 第九节  | $\alpha$ 聚集器测量          | (224) |
| 第十节  | $\alpha$ 仪测量            | (225) |
| 第十一节 | 热释光测量                   | (225) |
| 第十二节 | 液体闪烁测量技术                | (229) |
| 第十三节 | 氡气测量的若干发展               | (230) |
| 第十二章 | 氡气测量结果的解释与评价            | (236) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 第一节 关于解释的若干问题 .....              | (236) |
| 第二节 资料整理与图示及其他 .....             | (242) |
| 第三节 氦气测量的影响因素 .....              | (243) |
| 第四节 氦异常解释的若干模型 .....             | (245) |
| 第五节 氦异常的处理与评价 .....              | (249) |
| 第十三章 放射性气体在研究地质过程中的应用及其他用途 ..... | (255) |
| 第一节 在研究水文地质过程中的应用 .....          | (255) |
| 第二节 氦在油气勘查中的应用 .....             | (259) |
| 第三节 氦在地震预报中的应用 .....             | (260) |
| 第四节 氦在火山过程研究中的应用 .....           | (265) |
| 第五节 氦在现代地球动力学运动研究中的应用 .....      | (265) |
| 第六节 放射性惰性气体在化学研究中的应用 .....       | (269) |
| 第七节 居民建筑物中有关氦的若干问题 .....         | (270) |
| 第八节 氦及其测量方法在其他方面的应用 .....        | (271) |
| 第九节 射气应用的若干展望 .....              | (272) |
| 参考文献 .....                       | (273) |

## 第二编 核地球物理勘查——人工放射性测量

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 第一章 中子方法基础 .....             | (277) |
| 第一节 中子和中子源 .....             | (277) |
| 第二节 中子与地层的相互作用 .....         | (282) |
| 第三节 中子方法的分类 .....            | (286) |
| 第四节 中子方法的应用领域 .....          | (288) |
| 第五节 中子探测器 .....              | (289) |
| 第二章 中子测井基础和方法, 以及地面中子法 ..... | (290) |
| 第一节 中子测井的地质基础 .....          | (290) |
| 第二节 中子测井理论计算的参数 .....        | (291) |
| 第三节 中子测井仪的刻度和测井的应用 .....     | (294) |
| 第四节 利用连续中子源的测井 .....         | (297) |
| 第五节 利用脉冲中子源的测井 .....         | (301) |
| 第六节 其他的核测井 .....             | (305) |
| 第七节 野外现场的中子测量方法 .....        | (309) |
| 第三章 中子活化分析 .....             | (316) |
| 第一节 中子活化分析的原理 .....          | (317) |
| 第二节 中子活化分析的步骤 .....          | (318) |
| 第三节 中子活化分析的特点 .....          | (318) |
| 第四节 中子活化分析的应用 .....          | (318) |
| 第四章 X 射线荧光方法的物理-地质基础 .....   | (320) |
| 第一节 X 射线及其性质 .....           | (320) |
| 第二节 X 射线与物质的相互作用 .....       | (321) |
| 第三节 基体效应概述 .....             | (322) |
| 第四节 荧光产额与 X 射线总产额 .....      | (324) |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 第五章 X 射线荧光方法和技术 .....       | (325) |
| 第一节 激发源 .....               | (325) |
| 第二节 滤片 .....                | (330) |
| 第三节 探测器 .....               | (333) |
| 第四节 X 射线荧光仪简介 .....         | (335) |
| 第五节 现场测量的工作方法 .....         | (337) |
| 第六章 X 射线荧光测井 .....          | (340) |
| 第一节 基本原理 .....              | (340) |
| 第二节 测井仪器和装备简介 .....         | (341) |
| 第三节 测井仪器的工作 .....           | (343) |
| 第四节 测井的方法 .....             | (343) |
| 第五节 利用 X 射线荧光测井直接测铀技术 ..... | (345) |
| 第七章 X 射线荧光的室内分析 .....       | (347) |
| 第一节 基本公式和概念 .....           | (347) |
| 第二节 样品制备和测量方法 .....         | (348) |
| 第三节 影响测量的因素 .....           | (349) |
| 第四节 基体效应的校正 .....           | (349) |
| 参考文献 .....                  | (351) |

### 第三编 核地球化学勘查

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 第一章 核地球化学勘查引论 .....         | (353) |
| 第一节 定义、分类与任务 .....          | (353) |
| 第二节 背景值、异常下限与指示元素 .....     | (354) |
| 第三节 若干概念 .....              | (356) |
| 第四节 核化探的历史及未来 .....         | (359) |
| 第二章 核地球化学勘查基础 .....         | (362) |
| 第一节 天然放射性元素在自然界的分布 .....    | (362) |
| 第二节 放射性核素的运移和运移因素 .....     | (374) |
| 第三节 天然放射性同位素和放射成因同位素 .....  | (375) |
| 第四节 分散晕与分散流的分类 .....        | (380) |
| 第三章 核地球化学勘查的技术和方法 .....     | (383) |
| 第一节 放射性元素地球化学方法及有关问题 .....  | (383) |
| 第二节 放射性同位素地球化学方法及有关问题 ..... | (405) |
| 第三节 放射成因同位素地球化学方法 .....     | (430) |
| 第四节 其他的核地球化学方法 .....        | (435) |
| 第五节 野外工作方法和技术 .....         | (436) |
| 第四章 核地球化学勘查样品的分析测试 .....    | (439) |
| 第一节 核化探样品分析中的若干问题 .....     | (439) |
| 第二节 核化探样品的专用性分析 .....       | (442) |
| 第三节 核化探样品的常规分析方法 .....      | (450) |
| 第四节 质量监控有关问题 .....          | (451) |
| 第五章 数据整理及异常解释 .....         | (453) |

|      |                     |       |
|------|---------------------|-------|
| 第一节  | 应注意的几个问题 .....      | (453) |
| 第二节  | 核化探资料整理 .....       | (456) |
| 第三节  | 异常的解译评价 .....       | (462) |
| 第六章  | 氦气测量的物理基础 .....     | (467) |
| 第一节  | 氦的生成及其性质 .....      | (467) |
| 第二节  | 氦在自然界的分布 .....      | (472) |
| 第三节  | 氦的迁移 .....          | (484) |
| 第七章  | 氦气测量的仪器、技术和应用 ..... | (492) |
| 第一节  | 氦气测量的仪器 .....       | (492) |
| 第二节  | 氦气测量的工作方法 .....     | (500) |
| 参考文献 | .....               | (509) |

## 第四编 核技术勘查数据处理的数学保证

|      |                             |       |
|------|-----------------------------|-------|
| 第一章  | 数据的特点及处理方法 .....            | (513) |
| 第一节  | 概述 .....                    | (513) |
| 第二节  | 异常处理方法 .....                | (513) |
| 第三节  | 处理 $\gamma$ 能谱数据的因子分析 ..... | (517) |
| 第二章  | 勘查数据用于铀矿预测 .....            | (521) |
| 第一节  | 监督分类法 .....                 | (521) |
| 第二节  | 非监督分类法 .....                | (530) |
| 第三章  | 数据处理中应用的数学新分支 .....         | (533) |
| 第一节  | 稳健统计学 .....                 | (533) |
| 第二节  | 分形和分维理论 .....               | (537) |
| 第四章  | 绘图中计算机的应用 .....             | (540) |
| 第一节  | 等值图绘制的原理 .....              | (540) |
| 第二节  | 立体图绘制原理 .....               | (550) |
| 参考文献 | .....                       | (554) |

## 第五编 核技术勘查若干新思路及综合应用

|     |                         |       |
|-----|-------------------------|-------|
| 第一章 | 铀矿床普查与勘探的新思路 .....      | (555) |
| 第一节 | 铀矿勘查的多源地学信息复合分析技术 ..... | (555) |
| 第二节 | 模式找矿 .....              | (560) |
| 第二章 | 应用核技术勘查金矿床 .....        | (571) |
| 第一节 | 核技术勘查金矿床机理 .....        | (571) |
| 第二节 | 金矿勘查中综合参数的应用 .....      | (573) |
| 第三节 | 应用实例 .....              | (575) |
| 第三章 | 核技术在其他固体矿产勘查中的应用 .....  | (582) |
| 第一节 | 核技术在其他金属矿产勘查中的应用 .....  | (582) |
| 第二节 | 核技术在非金属矿产勘查中的应用 .....   | (586) |
| 第四章 | 以核技术为主的综合方法勘查油气藏 .....  | (589) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 第一节 核技术勘查油气藏机理 .....            | (589) |
| 第二节 综合方法勘查油气藏 .....             | (592) |
| 第三节 应用核技术解决油气勘查中的其他几个技术问题 ..... | (598) |
| 参考文献 .....                      | (601) |
| 附录 .....                        | (604) |

# 第一编 核地球物理勘查 ——天然放射性测量

## 第一章 核地球物理勘查引论

### 第一节 核物探及其研究对象和分类

核地球物理勘查,简称核物探,是基于原子核物理学、地质学、放射化学等学科的基础理论,通过相应的方法和仪器来研究介质中天然的和人工的核辐射场的变化规律,从而达到找矿和解决其他有关问题的一组方法。

核辐射场,В. А. 梅依耶尔(МЕИЕР)1988年是这样来定义的,它是指介质中射线的空间-能量分布,后者在总体上可由函数  $N(X) \equiv N(r, \Omega, E, t)$  来描述,也就是说,在每一个瞬时时间  $t$  内,具有坐标  $r$  的空间的点是由该射线运动方向的矢量  $\Omega$  和能量  $E$  所决定的,核辐射场有  $\gamma$  场、射气场、中子场等。

核地球物理勘查的天然放射性核素测量部分分为: $\gamma$  测量、射气测量和其他的天然射线测量<sup>[1]</sup>,扼要介绍如下:

#### 一、 $\gamma$ 测量

$\gamma$  测量,分  $\gamma$  总量测量和  $\gamma$  能谱测量。这两者按测量空间的不同,均可分为:航空的、汽车的、徒步的、钻孔的、水下的、地下工程的和辐射取样的等。目前国外应用  $\gamma$  总量测量甚少,只是在进行  $\gamma$  能谱测量,而运用总道时,才应用  $\gamma$  总量测量。 $\gamma$  能谱测量,按其测量阈值和范围的不同,又可分为微分测量和积分测量。

#### 二、氦气测量

射气测量,总体说可分为氦气测量和放射性(射气)惰性气体测量。后者除氦气测量应用较为广泛外,其余的如:氡气、氙气、氪气和氙气等测量,用于勘查目前尚很少。其中的<sup>85</sup>Kr 和<sup>133</sup>Xe是采用铀裂变而得到的放射性惰性气体,已在化学工业中得到了应用。氦气测量由于不是直接的放射性气体,在野外测量中,一般是采用取样分析的方法,习惯上将它归入核化探中,将在第三编进行介绍。这里我们只介绍氦气测量。氦气测量分天然氦测量和激发氦测量。

激发氦是最近一个时期才发展起来的。

天然氦测量,按其探测器的不同,可分为常规氦测量、 $\alpha$  径迹蚀刻测量、活性碳测量、 $\alpha$  仪测量、钋-210 测量\*、钋-218 测量(有的称  $\alpha$  聚集器测量,其中有:天然  $\alpha$  卡法、带电  $\alpha$  卡法、静电  $\alpha$  卡法、 $\alpha$  膜法和  $\alpha$  管法。 $\alpha$  膜法有的称氦膜法。 $\alpha$  管法有的称氦管法)、热释光测量、微尘测量和闪烁氦测量等。按测量的空间,天然氦测量主要是地面及浅孔氦测量。而航空氦测量、汽车氦测量和水下氦测量应用甚少,主要是干扰因素多。这也是影响该方法不能大面积推广应用的重要原因。

\* 有的人也将其划归为核化探,主要是根据它也是采样分析的方法。

### 三、其他的天然射线法

这方面的方法包括:天然中子法,中微子法,宇宙射线法和 $\beta$ 射线法等。它们在实践中应用甚少。

## 第二节 核物探的发展简史和与其他学科的关系

铀是1789年发现的,但其放射性一直到1896年才被法国物理学家贝克勒尔(H. Becquerel)所发现。两年后,玛丽亚·居里和皮埃尔·居里(Marie Curie, Pierre Curie)发现了新的放射性元素钋和镭,差不多在这个时期钍也相继被发现。1900年发现了氡。与此同时, $\alpha$ 、 $\beta$ 和 $\gamma$ 射线也先后被人发现。

1904年在加拿大开始出现收集和探测土壤和河水中氡的装置和方法。在这个时期有一大批俄国很出色的科学家,如А. П. 索柯洛夫(соколов)、И. И. 鲍尔格曼(Бортман)、В. И. 维尔拉斯基(Вернадский)、К. А. 勒拉特可维奇(ленакевич)和А. Е. 费尔斯曼(Ферсман)等,从事了放射性元素的地球化学研究。从1913年起,俄国在维尔拉斯基领导下,进行铀矿普查。但是,地质方法找矿是困难的。由于这个缘故,本世纪20年代首先在俄国和德国实现了 $\gamma$ 和射气测量的野外方法,以及矿块和粉样的放射性分析,天然产状下的 $\gamma$ 辐射取样。7~8年后在欧美一些国家也相继出现了这些野外方法。

30年代研制出了盖革计数管,并实现了 $\gamma$ 测井。

40年代出现了闪烁计数器,并开始使用 $\gamma$ 能谱测量方法。有趣的是,在这个期间放射性测量方法不是广泛地应用于找铀矿,而是更多地用于石油测井和石油勘查,与此同时,各种井下中子法的仪器也开始应用于实践。这可能同当时的能源需求状况有关。

50年代以来, $\gamma$ 能谱测量首先在实验室里被大量地用于测定岩石中铀、钍和钾的含量。不久后, $\gamma$ 能谱测量也开始用于铀矿普查,与此同时,直升飞机开始用于大面积的详查铀矿。但较为广泛地应用 $\gamma$ 能谱测量还是在60年代。在这期间,航空 $\gamma$ 能谱测量开始广泛应用,深部找矿已开始提到议事日程。

70年代以来,出现了各种积分氡法测量,并广泛地应用于勘查铀矿。氡法过去一直不被欧美各国所重视(可能与效率有关),但这个期间也开始大量应用,并取得了好效果。与此同时,计算机技术和遥感技术也开始大量地渗透到物化探工作中,并起着越来越大的作用。

80年代以来区域性的物化探工作得到了发展,特别是用于国土的矿产预测和环境研究。在这个期间引起重视的是航空 $\gamma$ 能谱测量,以及其他的航测及遥感技术。

我国的核物探工作的发展是从50年代中期开始的,除了各种 $\gamma$ 测量、氡气测量、天然产状下的 $\gamma$ 取样外,还发展了 $\gamma$ - $\gamma$ 测井、中子吸收法、光致中子法以及中子活化法等,并在煤田与石油的勘查中发挥了一定的作用。中国科学院院士、教授秦馨菱,于1955年,是我国第一个为原北京地质学院的大学本科生讲授放射性测量课的。前苏联列宁格勒矿业学院教授格·弗·诺维柯夫,于1956年,在原北京地质学院为我国研究生第一个讲授放射性勘探课的。60年代方法发展不快。在这个时期X射线荧光测量开始进行了研究。70年代开始,在石油和煤田勘查中,各种井下中子法得到了飞速的发展。在这个期间铀矿的“攻深找盲”也进行了一系列的方法研究。我国70年代到80年代,先后研制出多种类型的地面、井下和用于取样的 $\gamma$ 射线、氡和X射线荧光仪器。值得指出的是,在70年代中期,从 $\alpha$ 径迹找矿的兴起,使多种的氡及其子体方法象雨后春笋一样发展起来。80年代开始,航空 $\gamma$ 能谱测量和 $\gamma$ 测井的分层解释法,以及碳氧比方法等,有了较大的进展。从这个时候开始,核物探的天然放射性测量不仅仅是为了找铀矿,

而且亦已不自觉地走上市场经济的主战场,在油气的勘查、金矿的找矿、地下水资源的勘察、地基稳定性的监测、环境的监测与评价,以及地震的预报等方面,都已作出了很好的成绩。在相应的仪器方面也得到了很大的发展。

核物探是地学领域中一门应用分支学科,是在近代多种学科发展的过程中,在相互渗透和相互交叉中形成起来的。因此,它同不少学科有着密切的联系。

核物探是利用各种射线作用于介质后发生的各种物理效应和化学效应来研究核辐射场的变化规律,从而达到找矿和解决其他有关问题。原子核物理学正是研究 $\alpha, \beta, \gamma$ ,中子和X等射线的性质及其物理效应的,而辐射化学是研究化学效应的。所以这两门学科与核物探关系密切,而且是后者的基础。

要找矿,就必须知道矿赋存的地质条件,因而基础地质学同样是核物探的基础。

物探与核化探是核物探最近邻的学科,而且物探与核物探都是研究物理场的,而核化探与核物探同是以放射性核素为研究对象的。所以,它们三者中的一些原则是可以互相通用的,它们三者可以从不同的侧面来共同解决同一个问题,因而三者可以相互补充和相互验证。

核物探的发展还同其他的一系列学科有着密切的联系,例如,数理统计学、核电子仪器学和地球物理学等,因而,核地球物理勘查也可以说是应用地球物理学中的一门分支学科。

### 第三节 核物探今后的发展趋势

核物探的创立和应用已有70年了,但比较广泛的应用还不到半个世纪。过去由于世界性的保密,从事这个领域研究的人员还比较少,因而社会上对它的了解很是陌生,甚至由于不了解而产生一些偏见,因而导致这一学科的发展相对缓慢。核物探今后的发展:

一、要加强找深部矿方法的研究。在这一方面,人工放射性测量方法是个重要的发展方向。但由于这些方法的装置较为笨重,如中子法。致使在野外条件下难于推广应用,X射线荧光方法好一些。利用非放射性的激发源,如超声波,是另一个方向,例如激发氧测量。再一个就是研制快速轻便的浅孔打眼机,将探测器放入孔中测量,或探测器安装于钻头上,边钻边测。

二、要加强应用基础理论研究,探寻放射性核素的新性质和新参数,创立新方法新技术。可以移植和发展一些相近的非核物探的工作方法到核物探工作中。例如电磁法,这是基于电磁感应的一类方法,是个很有发展前途的方法。 $\gamma$ 射线也是电磁波,波长在 $1.2 \times 10^{-8} \sim 4.7 \times 10^{-11}$  cm范围内,这里是不是有些基础问题可研究呢?利用电化作用原理而建立起来的地电化学法也是电法的发展方向之一,同时又是化探的重要方法。类似这样的交叉学科,核物探可从中得到一些启示。

三、要加强定量解释,特别是反演问题的研究。核物探由于基础理论研究不够,干扰因素研究不够,所以要加强定量解释和反演研究,加强与非核物探的电法、磁法、重力法和地震法的综合解释。今后加强干扰因素和计算数学的研究是个突破口。

四、要大力开展扩大核物探应用领域研究,特别是应用领域机制问题的研究。一定要彻底改变观念,即核物探除了用于找铀矿外,它的应用领域是有广阔天地的,是大有发展前途的。要适应社会主义市场经济,首先要研究应用领域机制问题。海洋核物探可能是个充满丰富内容的领域。加拿大和英国已先走一步,在大陆架海底进行了 $\gamma$ 能谱测量。非核矿山和水平放射性地区的高氡浓度对人体的影响机制的研究也应摆到议事日程进行研究。