

四川省、国土资源部
“地学核技术”重点实验室

KEY LABORATORY OF APPLIED NUCLEAR TECHNOLOGY IN
GEOSCIENCE, SICHUAN PROVINCE AND THE MINISTRY
OF LAND AND RESOURCES, P.R. CHINA

年 报

ANNUAL REPORT

1998

成都科技大学出版社
PRESS OF CHENGDU UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

四川省、国土资源部
“地学核技术”重点实验室

KEY LABORATORY OF APPLIED NUCLEAR TECHNOLOGY IN
GEOSCIENCE, SICHUAN PROVINCE AND THE MINISTRY
OF LAND AND RESOURCES, P. R. CHINA

年 报

ANNUAL REPORT
1998

成都科技大学出版社
PRESS OF CHENGDU UNIVERSITY
OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

责任编辑 徐丹红
特约编辑 黄祖基 邓季娜

四川省、国土资源部“地学核技术”重点实验室
年报(1998)

成都科技大学出版社出版发行

西南冶金地质印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 10.375

1999年5月第一版 1999年5月第一次印刷

印数 1~500册 字数 246千字

ISBN 7-5616-3322-x/TD·20

定价:15.00元

目 录

核转变能与地球物质的演化	欧阳自远 (1)
地球化学指示剂——铂族元素的核分析方法	柴之芳 (4)
核探针技术及其应用	朱节清 (7)
功能晶体中杂质的辐照变价效应	林理彬 (15)
温度、岩石破碎程度对地气纳米微粒迁移的影响	
..... 葛良全 童纯葛 李巨初 (27)	
龙门山造山带两类不同成因花岗岩的地质地球化学特征对比	
..... 黄永健 张成江 汪云亮 刘树根 (33)	
钌及其子体向上运移的内因与团簇现象	贾文鹤
方 方 周蓉生 马英杰 邱元德 侯新生 吴允平 祖秀兰 王小琴 (37)	
理想条件下钌及其子体远移规律研究	贾文鹤
方 方 周蓉生 马英杰 邱元德 侯新生 吴允平 祖秀兰 王小琴 (44)	
应用原位 X 辐射取样技术现场测定钼矿品位	
..... 赖万昌 周四春 葛良全 赵友清 (51)	
断裂成矿年龄的核测年研究	梁兴中 钟康惠 高钧成 (57)
核地球物理学方法技术及其进展	李国栋 梁兴中 倪师军 (61)
四川若尔盖巴西金矿床金的赋存状态研究	罗 梅 李盛萍 (71)
大发沟金矿床流体成矿的元素地球化学信息	
..... 唐建武 张成江 倪师军 滕彦国 庑先国 (76)	
康定白金台子金矿床金的赋存状态及金矿物标型特征	唐 晋 汪云亮 (83)
论湘中锡矿山铋矿田硅化与矿化的关系	陶 瑛 唐建武 金景福 (86)
大发沟矿段成矿流体活动信息的核技术示踪试验研究	
..... 滕彦国 庑先国 倪师军 张成江 唐建武 章志明 (88)	
沉积有机质中的痕量元素:中子活化分析及其石油地球化学意义	
..... 童纯葛 杨国栋 (93)	
钛精矿品位在线检测系统及应用研究	庑先国 刘 磊 周建斌
童运福 成 毅 章志明 孟长春 戴向东 陈朝春 陈树民 周友斌 刘胜华 (98)	
特征参数分类法在重钢矿石品位荧光分析中的应用	庑先国 周建斌 成 毅
章志明 童运福 杨永亮 李家春 贾安才 黄绍成 赵 红 曾 静 汪树中 (104)	
录井岩样、油基泥浆荧光测定仪器与原理	庑先国
周建斌 童运福 章志明 成 毅 曾 兵 李 健 李一超 曹洪辉 (109)	
元素的丰位差和迁移位差——以西范坪斑岩铜矿为例	
..... 汪云亮 修淑芝 黄永健 侯新生 (113)	

铈异常的类型及其参比标准	修淑芝 汪云亮 张成江 黄永健	(116)
宜汉气田上方地气异常特征分析	杨凤根 童纯葛	(122)
新街峨眉山玄武岩·层状岩体·正长岩的铂族元素演化		
..... 张成江 汪云亮 修淑芝 黄永健 李晓林		(129)
核技术找水在抗旱救灾中的作用 ... 赵友清 梁锦华 赖万昌 葛良全 周四春		(136)
川西“金三角”地区多参数 X 荧光测量现场勘查金矿		
..... 周四春 陈慈德 赵琦 张志全 黄明湘		(139)
小口径多元素新型 X 荧光测井仪的研制		
..... 周四春 葛良全 章 晔 程业勤 雷启福 姚安兵		(145)
锶矿 X 荧光现场勘查技术在川东地区的找矿效果		
..... 周四春 张志全 徐兴国 叶 沈 邹永谦		(149)
神经网络技术在测井解释中的应用	祖秀兰 马英杰 史治平 周蓉生	(154)
地学核技术应用开发实验室学术委员会会议纪要(阜)		(158)
“X 荧光技术研究与应用”成果喜获国家科技进步奖		(162)

核转变能与地球物质的演化

欧阳自远

(中国科学院地球化学研究所)

【摘 要】 本文介绍了地球物质中核衰变、重核自发与诱发裂变及各种类型的核反应产生的核转变能,论证了在地球历史上的某些部位有可能形成天然核反应堆,认为地球物质中的核转变,一方面更新地壳的成分,另一方面又成为地球演化的主要内能源。

【关键词】 核转变能 地球演化

地球的能源可分为两个近乎相互独立而又统一的系统,即外来能与内生能。外来能主要包括太阳能、天体与地球相互作用的引力能及小天体撞击地球由动能和势能转变的热能等,内生能包括地球物质的各种化学过程、结晶作用产生的化学能及核衰变、重核自发与诱发裂变及各种类型的核反应产生的核转变能。核转变能是地球内部物质演化的主要能源。

形成绝大多数核素的 r 和 s 过程的时间、元素形成时同位素的原始丰度、核素的半寿期及地球各圈层物质中各核素的丰度是计算地球物质中核转变能的基础,也制约行星物质演化过程中能量的产生、传导、分布与作用。根据元素起源的理论,太阳系元素起源的最终年龄为 54~50 亿年,地球形成的时间约为 45.5 亿年。半寿期为 $10^5 \sim 10^{10}$ 年量级的核素对地球的演化有实际意义。半寿期为 $10^2 \sim 10^8$ 年的中等寿期的核素对地球形成后的初期演化有重大的影响,长寿期核素 ($n \times 10^9 \sim n \times 10^{10}$ 年) 对地球的持续演化有重要意义。

现今 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的比值为 0.0072,根据恒星中元素合成的理论,各种核过程的产额计算, $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的初始比值为 1.64 或 1.97 与 1.80。根据 ^{235}U 和 ^{238}U 的半衰期,表明地球历史中 ^{235}U 有大量非衰变消耗。通过计算,当富含铀矿石的地层中有适量水或碳等慢化剂时,在 18 亿年前自然界存在 ^{235}U 的链式诱发裂变,在富含铀的地层中有可能形成天然“核反应堆”。要重新评价和计算 ^{235}U 在 18 亿年前的地球演化早期对核转变能的特殊贡献。

综合地球物质中各种核转变能的贡献:(1)短半衰期核素的衰变能,在元素形成后的 10^7 年内,占有重要地位。在 $0.1 \sim 0.2 \times 10^8$ 年间,变得次要且很快消失。(2)中等半衰期核素的衰变能,由 5.5×10^{21} 卡/年迅速减小到 1×10^{20} 卡/年,在元素形成后的 15 亿年内的地球演化历史中,逐渐不具有重要意义。(3)长半衰期核素的衰变能,是地球内能的重要能源。在整个地球历史中由 23×10^{20} 卡/年减少为 0.12×10^{20} 卡/年。在 2×10^9 年前占各

种核转变能贡献的第二位,在 20~18 亿年之后,占各种核转变能的首位。(4) ^{235}U 的中子诱发裂变能,在地球历史开始后的 3×10^9 年内,是各种核转变能中最重要的能源,达到 $10^{22} \sim 10^{21}$ 卡/年。(5) 重核自发裂变能,对地球物质演化的贡献极其有限。

地球历史中的各种核转变能的变化,地球物质的演化可划分为以下几个阶段:(1) $(5 \sim 4.5) \times 10^9$ 年,即元素形成后,地球形成时以短半衰期核素衰变能为主,其次以 ^{235}U 诱发裂变与中等寿期核素的衰变能,能量可达 10^{22} 卡/年量级。(2) $(4.5 \sim 1.9 \pm 0.1) \times 10^9$ 年,核转变能以 ^{235}U 的诱发裂变能为主,能量达 $n \times 10^{21}$ 卡/年。根据核转变能的特征与变化速度,进一步划分为:① $(4.5 \sim 3.5) \times 10^9$ 年,核转变能以 ^{235}U 诱发裂变为,达 $(6.5 \sim 10) \times 10^{21}$ 卡/年。② $(3.5 \sim 2.6 \pm 0.1) \times 10^9$ 年,核转变能以 ^{235}U 诱发裂变能与长寿期核素衰变能为主,达 $(3.5 \sim 6.5) \times 10^{21}$ 卡/年,能量随时间变化迅速。③ $(2.6 \pm 0.1 \sim 1.9 \pm 0.1) \times 10^9$ 年, ^{235}U 诱发裂变能与长寿期核素衰变能几乎各占总能量的一半,达 $(1 \sim 3.5) \times 10^{21}$ 卡/年,能量变化极为迅速。近 $(1.9 \pm 0.1) \times 10^9$ 年时, ^{235}U 的诱发裂变能近于消失。(3) $(1.9 \pm 0.1 \sim 0.6 \pm 0.05) \times 10^9$ 年,核转变能为长寿期核素衰变能,达 $(10 \sim 8) \times 10^{20}$ 卡/年。能量的变化速度极其缓慢。根据核转变能的变化可划分为 $(1.9 \pm 0.1 \sim 1.0 \pm 0.1) \times 10^9$ 年阶段,以 ^{238}U 和 ^{40}K 的衰变能为主; $(1.0 \pm 0.1 \sim 0.6 \pm 0.05) \times 10^9$ 年,以 ^{232}Th 及 ^{238}U 的衰变能为主。(4) $(0.6 \pm 0.05) \times 10^9$ 年至今,以 ^{232}Th 的衰变能为主,其次为 ^{238}U ,能量达 $(6.5 \sim 7) \times 10^{20}$ 卡/年。

地球演化的阶段性,与地球构造演化的大轮廓,与大气圈由原始火山气圈 $\rightarrow$ 火山气圈 $\rightarrow \text{CO}_2$ 气圈 $\rightarrow$ 氮、氧气圈的演化及与水圈由原始酸性水圈 $\rightarrow$ 氯化物水圈 $\rightarrow$ 氯化物碳酸盐水圈 $\rightarrow$ 氯化物、碳酸盐、硫酸盐水圈的演化历程相适应。由此计算地球内部的热状态与热平衡,合理解释了现今地球的热流、海底扩张与板块运动的能量以及地震、火山与热火活动的能量。

核转变还引起了地球物质中同位素组成的异常。自地球形成以来,核衰变过程使 ^{238}U 、 ^{40}K 、 ^{232}Th 及 ^{235}U 减少至原始丰度的 $1/30$ 、 $1/8$ 、 $1/10$ 及 $1/2$; ^{138}La 、 ^{147}Sm 及 ^{176}Lu 减少了 3%~13%。而衰变成由铅占地球铅总量的 $1/5$, ^{138}Ba 、 ^{138}Ce 、 ^{143}Nd 、 ^{176}Hf 、 ^{143}Ce 增长了 0.22% 甚至 1.7%; 而 ^4He 、 ^{40}Ar 、 ^{146}Pm 、 ^{150}Pm 、 ^{216}Po 、 ^{227}Ac 、 ^{233}Fr 及 Rn 等几乎全由核衰变所形成。元素周期表中 Te 、 I 、 Ar 、 K 及 Co 、 Ni 等元素的位置异常,也与地球历史中核衰变有关。地球物质中的核衰变,不仅更新地球的化学成分,甚至可以成为衰变成因的有用资源,如 ^3He 、 ^4He 、 ^{187}Os 等。重核的自发裂变与诱发裂变,主要产生 $A=80 \sim 100$ 及 $A=130 \sim 150$ 的两组核素,也影响到自然界中某些核素的丰度。地壳矿物中存在极其广泛而复杂的核反应,如 (n, α) 、 (n, γ) 、 $(n, 2n)$ 、 (α, p) 、 (α, n) 、 (α, γ) 、 (α, α) 、 (p, n) 等,产生一系列新的核素,甚至地球中已灭绝的核素。宇宙线与地球物质产生的核反应,形成 60 多种宇宙成因核素。地壳中的核反应,使我们有可能探测到自然界已“灭绝”的元素 (Tc 、 Pm) 及自然界的超铀元素 Np 、 Pu 、 Am 和 Cm 。

总之,地球物质中的核转变,一方面更新地球的成分,另一方面又成为地球演化的主要内能源,因而研究地球物质中核素的演变与转化,将为认识地球演化的规律提出新的论证。

NUCLEAR TRANSFORMATION ENERGY AND MATTER EVOLUTION IN THE EARTH

Ouyang Ziyuan

(Institute of Geochemistry of the Chinese Academy of Science)

Abstract This paper introduces several types of nuclear transformation energy from nuclear decay, induced fission and self fission of heavy nucleus and other types of nuclear reactions. It is propalle that natural nuclear reactions exist in some places in the earth's history. The nuclear transformation in the earth can not only change the components of the earth, but provide main inner energy for evolutions of the earth.

Key words nuclear transformation energy, evolution of the earth

地球化学指示剂——铂族元素的核分析方法

柴之芳

(中国科学院高能物理研究所)

【摘 要】 本文简要介绍了铂族元素的核分析方法,论述了铂族元素在地球化学中的指示作用及具体应用,提出了今后铂族元素研究的可能发展方向。

【关键词】 铂族元素 核分析 地球化学示踪

1 铂族元素在地球化学中的指示作用

- 用于研究导致地球演化过程中生物大绝灭的稀有事例。
- 用于鉴别宇宙尘、陨石以及可能起源于地外的物质。
- 用于地质断代。
- 用于环境地球化学示踪。
- 用于生物地球化学的研究。

2 铂族元素的准确测定是分析化学的难题之一

- 自然界丰度低,在 $10^{-9} \sim 10^{-15}$ g/g 水平。
- 化学行为复杂,尤其是易络合,导致化学种态的多样性。

3 现代核分析方法

- 中子活化分析(仪器和放化)。
- 带电粒子活化分析。
- 质子激发 X 荧光分析(包括扫描质子微探针)。
- 加速器质谱分析。

4 中子活化分析

- 仪器中子活化分析。
 - * 常规仪器中子活化分析法。
 - * 超热仪器中子活化分析法。
 - * $\gamma\gamma$ 或三 γ 符合测量法。
- 放射化学中子活化分析。
 - * 硫酸沉淀法。
 - * 离子交换法(阴离子、阳离子、螯合离子)。
 - * 溶剂萃取(N_{1473} 长链伯胺法)。
 - * 其它(蒸馏法、电化学法)。
- 关键在于化学种态的调节。

5 分子活化分析

- 基本思想。
- 铂族元素分子活化流程。
- 典型实例(白垩纪—第三纪界线粘土)。

6 具体应用

- 地外物质鉴别。
- 幔源岩。
- K-T 剖面的恐龙蛋壳
- Os-Ir 相关性
- 海洋体系中的铂族元素吸附-解吸行为
- $^{184}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 及 $^{96}\text{Ru}/^{102}\text{Ru}$ 比值。

7 展望

- 提出了今后铂族元素研究的可能发展方向。

参 考 文 献

- [1] “现代核分析技术及其在环境科学中的应用”项目组,核分析技术与环境科学原子能出版社 1997,10

THE ANALYSIS OF PLATINUM GROUP ELEMENTS—GEOCHEMICAL INDICATOR

Chai Zhifang

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy Sciences)

Abstract This article introduces the nuclear analytical methods of platinum group elements, discusses the role of platinum group elements as geochemical indicators, exemplifies of the platinum group elements on geoscience and comments on the future development orientation of platinum group elements study.

Key words platinum group elements, nuclear analytical methods, geochemical indicators

核探针技术及其应用

朱节清

(中国科学院上海原子核研究所)

【摘 要】 本文介绍了用于研究物质微区结构的电子探针、核探针、X 射线探针、激光 ICP 质谱、离子探针和加速器质谱等六种现代探针技术。论述了核探针的结构、空间分辨率、分析灵敏度 and 样品深度以及核探针在地质领域的应用与效果。

【关键词】 核探针 地质学

1 核探针与其它探针

探针技术提供了研究物质微区结构的方法,它能直接进行原位分析,近年来获得迅速发展,主要有六种探针(表1)。其中电子探针使用最广泛,它的人射线是 KeV 电子束,出射

表: 探针的入射线、出射线和使用的分析技术

探针	入射	出射	分析技术
电子探针 EMP	KeV 电子	背散射电子	BSE
		X 射线	EIXE
		可见光	EL
核探针 NMP	MeV 离子	X 射线	PIXE
		二次电子	SEI
		γ 射线	NRA
		背散射离子	RBS、沟道效应
		弹性反冲核	ERDA
		中微子	IL
		感生电荷	IBIC
X 射线探针 SXRF	同步辐射	X 射线	XRF
激光 ICP 质谱 LA-ICP MS	激光	汽化离子	ICP 质谱
离子探针 IMF	KeV 离子	溅射离子	质谱
加速器质谱探针 μ AMS	KeV 离子	溅射离子	加速器质谱

线是散射电子、X 射线和可见荧光,它们分别用于显微成像、X 射线分析和可见荧光分析。核探针使用由加速器产生的 MeV 高能离子束,轰击试样后能产生多种二次辐射,因此它能同时使用多种核分析手段,从不同角度来表征物质的微观特性,从分析角度来看,它是最具活力的一种探针。

人们在比较各种探针性能时,往往考虑它们的空间分辨率和分析灵敏度(检测限),然而,这二项指标是互相制约的,优良的空间分辨率往往要牺牲分析灵敏度。图1画出这六种探针的空间分辨率和分析灵敏度的一般关系,由于电子束和 KeV 低能离子束比较容易聚焦,电子探针和离子探针的空间分辨率可以达到纳米量级。但是很高的韧致辐射本底,使电子探针的分析灵敏度比核探针差二个多量级。一般来说,核探针的空间分辨率是 $(1\sim 10)\times 10^{-6}\text{m}$,最小检测限是 $(1\sim 100)\times 10^{-6}$,空间分辨率小于 $1\times 10^{-6}\text{m}$ 的核探针主要用于显微成像。同步辐射 X 射线束和激光束难以获得小于微米的空间分辨率,如果不考虑空间分辨率,它们的分析灵敏度优于核探针。由于使用高灵敏质谱技术,激光-ICP 质谱探针和离子探针的分析灵敏度优于核探针。如果使用加速器质谱,离子探针的检测限可以达到 10^{-10} 水平。然而,从原位分析的角度,只有电子探针、核探针和 X 射线探针才是非破坏性的无损分析。

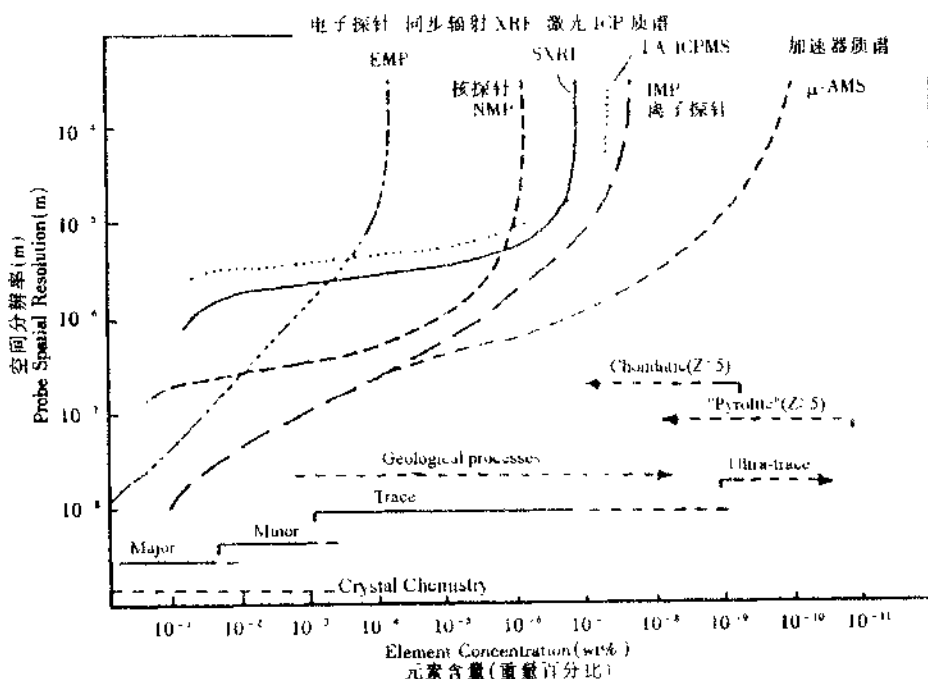


图1 探针的空间分辨率和最小检测限的关系

在地质分析中,探针的穿透深度是至关重要的。激光、电子和 KeV 低能离子的射程只有 $(1\sim 2)\times 10^{-6}\text{m}$, 并且进入样品后束斑迅速扩大。为了保持高的空间分辨率,要制成超薄试样。MeV 高能离子的射程较大,对于大多数地质试样,核探针的有效深度大于 $30\times 10^{-6}\text{m}$,见图 2,与其微米量级的空间分辨率相比,这样的穿透深度是比较恰当的。同步辐射 X 射线能够穿透毫米层,为了避免深层结构对表层分析的影响,需要将样品切片成适当的厚度。

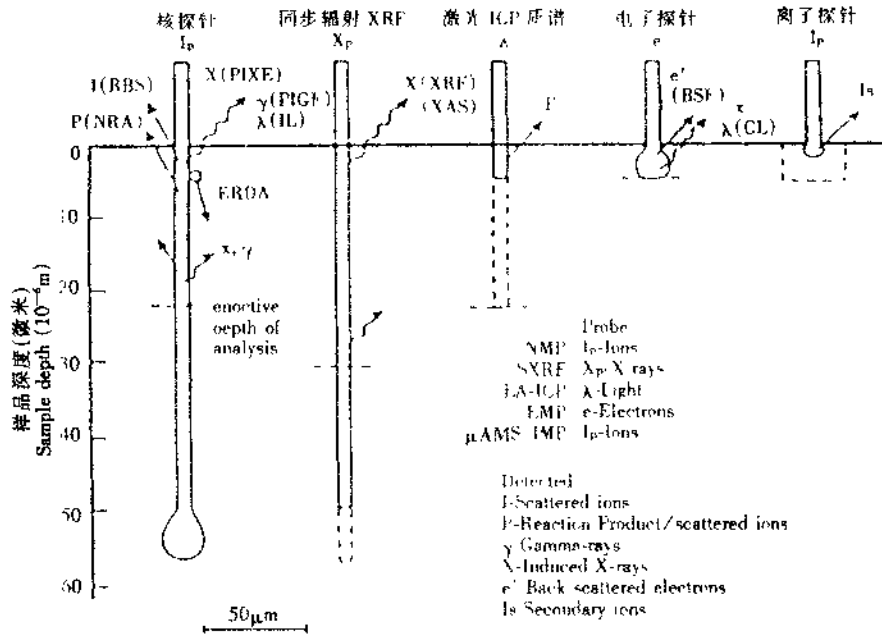


图 2 探针在地质样品中的穿透深度

2 核探针主要结构

核探针是 70 年代发展起来的一种适合在微米尺度内研究微量元素微区结构的工具。我国自从 1989 年第一台核探针在复旦大学建成以来,在这个领域里从无到有迅速发展。目前我国已经在三个加速器实验室建立了核探针。就现在水平,我国核探针已经达到 $1\times 10^{-6}\text{m}$ 的空间分辨率,使用的核分析手段包括质子激发 X 射线分析(PIXE)、核反应分析(NRA)和背散射(RBS)等。上海原子核所的核探针(简称上海核探针)是采用长焦距四组合磁透镜,整个探针管道安装在有两个防震支柱上的 9 m 长的钢梁上,见图 3。它的离子光学缩小系数是 20,如果选择 $20\times 10^{-6}\text{m}$ 的入射物孔,不考虑透镜像差,在试样表面可以获得 $1\times 10^{-6}\text{m}$ 的束斑。为了减小像差,在管道中部设有限定发散角的光阑。在聚焦透镜后面,有一对扫描线圈,它们使聚焦的束斑在试样表面作二维扫描,从而观测试样特性

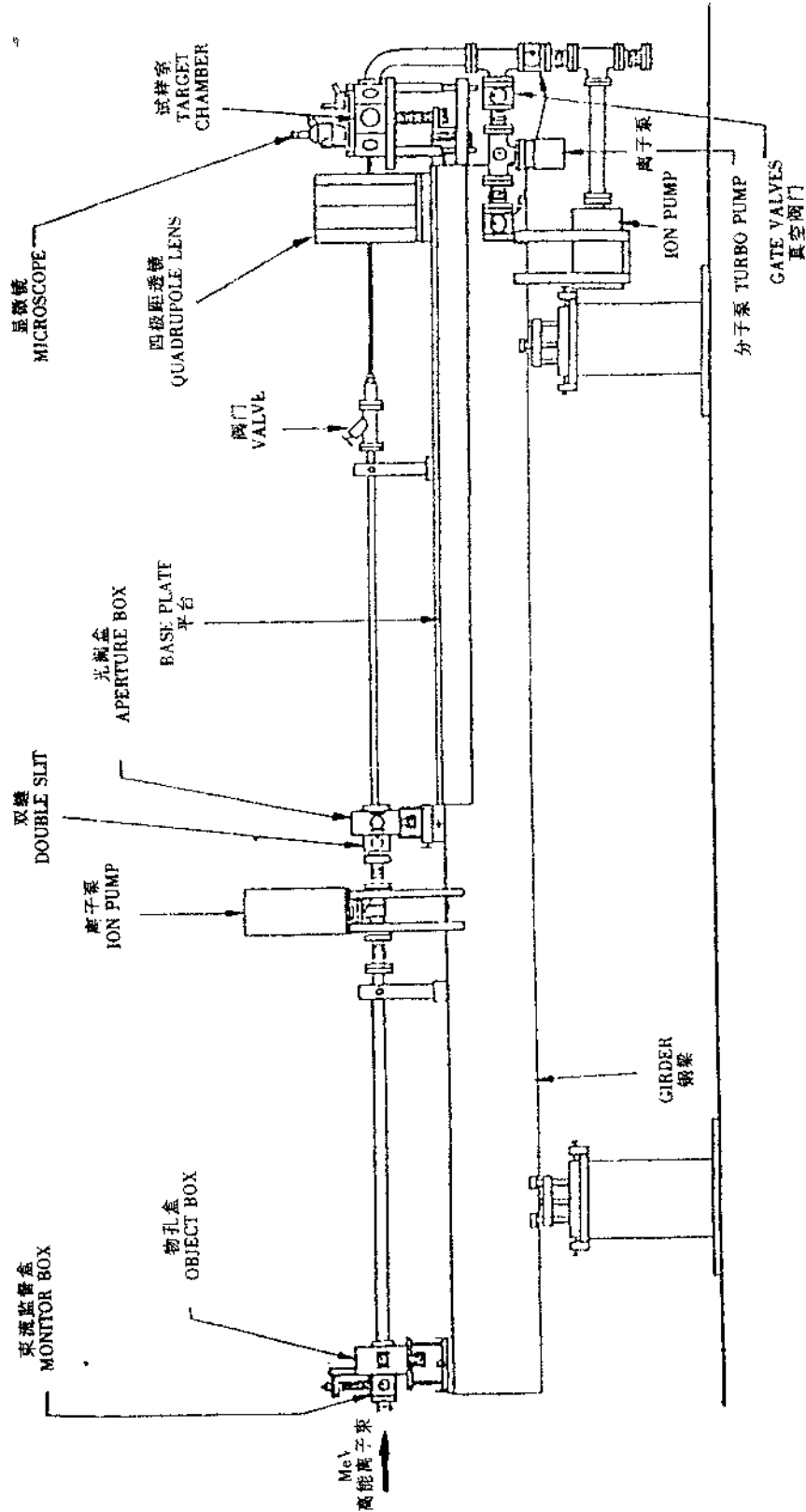


图 3 核子微探针安装图(上海原子核所)

的二维分布。核探针用的高能离子束是由一台端压 4 MV 的加速器产生。

长聚焦透镜的优点是景深好、分辨率高,并且透镜和试样之间的工作距离大(40 cm),有足够空间放置扫描线圈、显微镜和多种核探测器,使一次扫描分析能够从不同角度同时获得试样的不同特性。为了实现多种核效应同时测量的能力,上海核探针建立的多站多参量数据系统,能够同时获得来自四个不同探测器的多参量信号。

在探针的原位分析中,试样必须保持原来状态,不能添加内标元素,因此,常规的定量分析方法不能适用。对于地质试样,大多数是中厚样品。为了开展核探针的厚靶无标样定量分析,在基本参数法的基础上开发了一些定量分析的软件,其中比较著名的是澳大利亚 CSIRO 地质实验室开发的 Geo-PIXE 和加拿大 Gulph 大学开发的 Gulph-PIXE 二个软件。澳大利亚这个实验室的核探针是世界上为数不多的掌握在地质学家手中的一个,他们每年要分析几万个地质样品。上海核探针也开发了一个定量分析软件 TTSPM,经过地质标样检定,它的分析精度好于 15%。

3 核探针(上海原子核所)在地质中的应用

地质样品通常由一些复杂而不均匀的矿物体组成,矿物中包含一些成份各异的矿物相,还嵌有粒度小至微米级的流体包裹体,核探针是研究这些微小矿物体的理想工具。通过对硫化锰矿石的扫描分析,在几百微米的范围内我们发现很多既不含锰,又不含硫的矿物结晶和矿粒,它们有的富铁或富钙,有的含有浓度很高的铅和锌,有的含少量元素镉、铈、钛和钴等。金和铂等稀贵金属在岩矿中经常存在于独立的矿物体中,核探针能够原位定量分析这些微米大小的矿物体,研究贵金属在这些矿物体中的赋存状态。我们分析了平均品位小于 8×10^{-6} 的砂金矿,它们是由 FeS_2 、 FeS 、 CuFeS 、 CaS 和 ZnS 等矿粒组成。经过核探针分析,我们发现大部分金是富集在 CuFeS 矿粒中。我们用核探针研究了新街岩体中铂族元素的赋存状态。首先通过地层岩芯中子活化分析,富铂层被确定在靠近岩体底部的斜长单辉岩硫化矿层中。再用核探针对该岩层的样品进行微区扫描分析,从微区的元素分析图中,见图 4,我们可以清楚地看到一些铂和砷共存的独立矿体。从这些小矿体获得 PIXE 能谱,见图 5,进行定量分析,确定铂是以 PtAs_2 的砷铂矿形式独立存在于该硫化矿层中。这项研究结果对指导地质开采和矿石选冶都很有价值。

核探针还成功地分析了深海锰结核的纹层结构。由于海洋矿物是以每百万年几毫米的速度缓慢沉积的,根据不同纹层的分析,可以了解它们的成长过程和洋底环境的变迁。为了研究这些纹层,人们曾经用钻孔取样分析的方法,但是,这种方法提供的是毫米尺度的变化。使用核探针,我们能够对锰结核的纹层结构以微米尺度进行直接观测。在微米区域间,我们证实了一些金属元素含量的相关性,并且根据分析结果计算了锰结核各纹层生长速率的变化。

核探针具有微米的分辨率和几十微米的穿透深度,它是直接无损分析掩埋在岩石中的流体包裹体最理想的工具。为了定量分析包裹体内的化学成份,首先必须知道它们的掩埋深度和包裹体厚度。根据特征 X 射线 K_α 和 K_β 比值的变化,可以计算出掩埋深度。

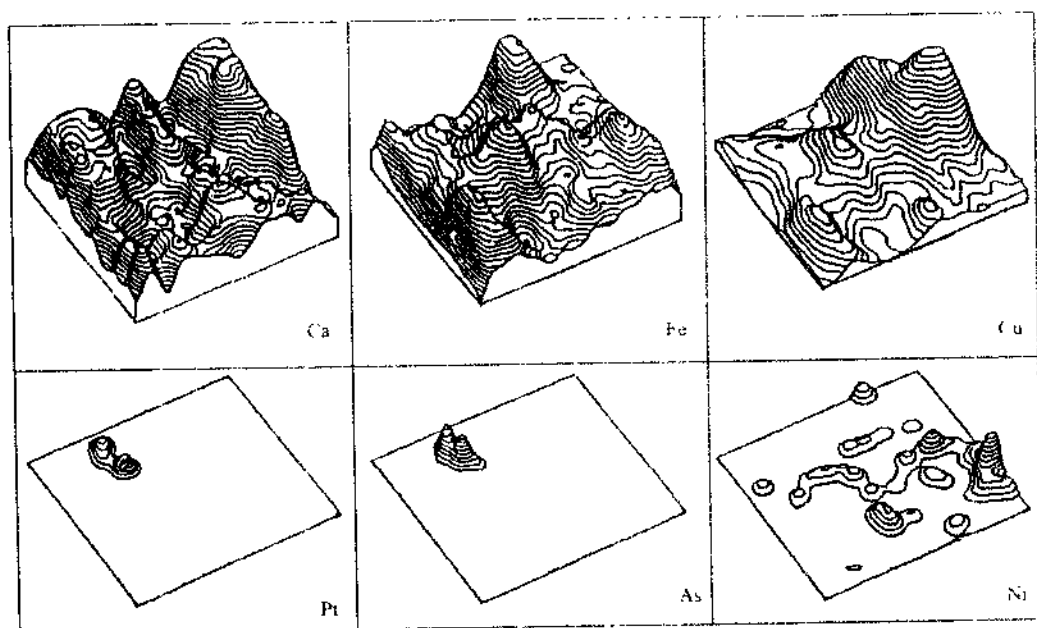


图 4(a) 在 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 范围内一个硫化矿样品的各种元素分布图

由于流体包裹体中常含有 Na 元素, 岩石中含有大量的 Si 元素, 因此, 有人建议用 $\text{Na}^{23}(\text{P}, \text{P}')\text{Na}^{23}$ 和 $\text{Si}^{28}(\text{P}, \text{P}')\text{Si}^{28}$ 共振核反应分析来计算包裹体的深度和厚度。Geo-PIXE 定量分析软件能够定量计算包裹体化学成份, 据称其分析精度达到 20%。目前, 国内核探针测量流体包裹体还限于定性分析的水平。

上海核探针还被用来研究地幔的交代作用, 研究恐龙化石中奇异元素的微区分布、单体分析放射虫等微体古生物化石以及研究岩床镍铁陨石的晶胞结构等。

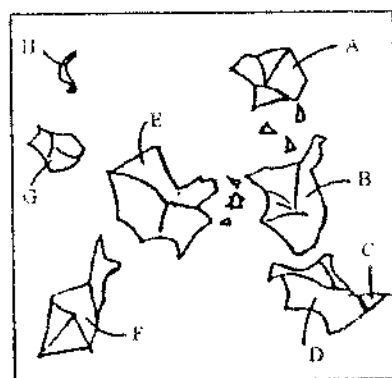


图 4(b) 一个硫化物矿样品的显微图像

图中 A、D、E 和 G 为黄铜矿, B 为斑铜矿, C 为镍黄铁矿, H 为砷