

现代核分析技术与



中国古陶瓷

程琳 金莹

著



科学出版社

现代核分析技术与中国古陶瓷

程 琳 金 莹 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

中国古陶瓷是中国最珍贵的文化遗产，其中蕴藏着中国古代丰富的科学技术和灿烂的古代文明。本书介绍了著者用中子活化分析、质子激发 X 射线荧光和毛细管聚焦的微束 X 射线荧光等核分析方法为手段研究中国古代若干产地古陶瓷的年代和产地特征的成果。

本书对广大从事核分析技术、科技考古、文博工作者以及中国古陶瓷爱好者来说，都是一本难得的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代核分析技术与中国古陶瓷/程琳，金莹著. —北京：科学出版社，2015

ISBN 978-7-03-042483-9

I. ①现… II. ①程… ②金… III. ①核技术应用-古代陶瓷-研究-中国
IV. ①K876.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 268205 号

责任编辑：鲁永芳 / 责任校对：邹慧卿

责任印制：赵德敬 / 封面设计：陈敬

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>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张：10

字数：192 000

定价：59.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

本书收录了著者从 2000~2013 年从事中国古陶瓷科技研究工作的成果。用中子活化分析、质子激发 X 射线荧光、同步辐射 X 射线荧光、毛细管聚焦的微束 X 射线荧光等多种分析技术分析研究了若干产地的古陶瓷、古琉璃等化学成分、年代和产地特征等,取得的一系列的研究成果。书中大部分科研成果已发表在国内外多种刊物上,为方便读者阅读,将其出版成书。本书对从事科技考古、古陶瓷研究等科研人员和文物科技研究感兴趣的人员有一定的参考价值。

本书由北京师范大学核科学与技术学院暨北京市辐射中心程琳副教授和吉林建筑大学建筑与规划学院金莹副教授整理合著而成。书中科研工作和出版工作得到了北京市自然科学基金(项目编号:1102022, 1112014)、国家自然科学基金(项目编号:11175022)、射线束技术与材料改性教育部重点实验室开放课题、中央高校基本科研业务费专项资金(项目编号:2014KJJCB06)、2014 年度首都科技条件平台科学仪器开发培育项目、北京市辐射中心改革与发展自主选题等项目支持,特此表示衷心的感谢!

由于著者水平有限,书中难免有错误或不当之处,恳请广大读者,专家和学者批评指正。

程 琳

2014 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 中国古陶瓷科技研究的必然性	1
1.1 中国古陶瓷科技研究已有的成果	1
1.2 中国古陶瓷研究的目的和意义	2
1.3 古陶瓷产地的研究方法及其判别的途径	3
1.4 国内外科技研究古陶瓷的现状	5
参考文献	6
第 2 章 中子活化分析	8
2.1 中子活化分析的原理	8
2.2 中子活化分析的定量方法	13
2.3 活化分析的灵敏度	13
2.4 中子活化分析研究古陶瓷样品的优缺点	14
参考文献	15
第 3 章 中子活化分析应用于古陶瓷的产地和年代分期的研究	16
3.1 陕西西岳庙和立地坡古琉璃产地的研究	16
3.1.1 陕西西岳庙的简介	17
3.1.2 陕西西岳庙和立地坡古琉璃的中子活化分析	22
3.1.3 陕西西岳庙古琉璃胎料的分析结果与讨论	35
3.1.4 陕西西岳庙和立地坡古琉璃胎料产地的分析	36
3.2 江西湖田窑瓷器的中子活化分析	47
3.2.1 古瓷胎的中子活化分析	51
3.2.2 宋代青白釉瓷胎的分析	53
3.2.3 结果与讨论	57
3.2.4 结论	58
参考文献	78

第 4 章 质子激发 X 射线荧光和同步辐射 X 射线荧光	80
4.1 江西湖田窑青白釉瓷的 PIXE 分析	80
4.1.1 实验	80
4.1.2 因子分析	83
4.1.3 结果与讨论	84
4.2 江西湖田窑明代青花瓷器的分析	86
4.2.1 实验	86
4.2.2 结果与讨论	88
4.3 同步辐射 X 射线荧光应用于陕西古琉璃的研究	89
4.3.1 SRXRF 分析古琉璃胎的化学组成	90
4.3.2 实验数据的多元统计分析	92
4.3.3 结果与讨论	92
4.3.4 SRXRF 分析古琉璃釉的化学组成	93
参考文献	98
第 5 章 毛细管 X 光透镜聚焦的微束 X 射线荧光分析	100
5.1 微束 XRF 国内外的研究现状	102
5.1.1 在环境科学中的应用	102
5.1.2 在文化遗产的科技研究中的应用	104
5.2 毛细管 X 光透镜及其特性的表征	107
5.3 微束 X 射线荧光分析系统的建立及其特性	113
5.3.1 微束 X 射线荧光分析系统的组成	114
5.3.2 自动测量控制程序的开发	115
5.3.3 微束 X 射线谱仪的焦斑特征和能谱的测量	115
5.3.4 经过 X 光透镜聚束后 X 射线能量和强度的分布	116
5.3.5 微束 X 射线荧光分析系统的探测极限	118
5.4 微束 X 射线荧光分析在考古学中应用	120
5.4.1 微束 XRF 应用于古陶瓷分析的方法学研究	120
5.4.2 青花瓷微区元素分布的扫描分析	121
5.5 古汝瓷和古钧瓷的微束 X 射线荧光分析研究	125
5.5.1 古汝瓷和钧瓷中间过渡层的线扫描分析	125

5.5.2 古汝瓷和古钧瓷中间层的面扫描分析	129
5.5.3 古汝瓷和古钧瓷釉面元素分布扫描分析	132
5.6 毛细光 X 光透镜应用于古代高铅釉样品的分析和研究	135
5.6.1 实验	136
5.6.2 清代彩绘瓷的无损分析研究	140
5.6.3 结果与讨论	141
5.7 微束 X 射线荧光应用于北京龙泉务窑白瓷化学组成的研究	142
5.7.1 实验	143
5.7.2 因子分析	146
5.7.3 结果与讨论	147
参考文献	147

第1章 中国古陶瓷科技研究的必然性

美国诗人郎费罗说，创造历史的人“在时光的沙滩上留下了脚印”。历经风吹雨打、霜打雨淋，“沙滩上的脚印”会变得模糊不清，但其痕迹却不会完全消失，借助现代科学技术，可望重现这些“脚印”。

1.1 中国古陶瓷科技研究已有的成果

1998年出版的《中国科学技术史(陶瓷卷)》对中国若干名窑古瓷的烧成工艺、配方等进行了系统的总结和归纳，展示了中国古陶瓷研究的辉煌成就。从已经取得的丰硕成果来看，中国古陶瓷的发展历程基本上可以划分为五个里程碑和三大技术突破^[1]。五个里程碑分别是：①新石器时代早期陶器的出现，它对中国古代的文明具有极其重要的贡献^[2]。②新石器时代晚期印纹硬陶和商、周时期原始瓷的烧制成功。③瓷器的出现，东汉(25~220年)晚期以越窑为代表的南方青釉瓷的烧制成功标志着中国陶瓷工艺发展中的又一个飞跃，是我国陶瓷科学技术史的第三个里程碑。④隋唐(581~907年)时代北方白釉瓷的突破，它的出现不仅打破了青釉瓷一统天下的格局，形成了我国陶瓷历史上“南青北白”相互争艳的两大体系，而且为后世的颜色釉瓷和彩绘瓷提供了发展的物质基础。它的出现是我国制瓷工艺的又一个飞跃，使我国成为世界上最早拥有白釉瓷的国家，是我国陶瓷科学技术史上第四个里程碑。⑤宋代到清代(960~1911年)的各大名窑，诸如官窑、哥窑、钧窑、汝窑、耀州窑、临汝窑、磁州窑、吉州窑、龙泉窑、建窑、长沙窑、德化窑、宜兴窑，以及后来兴起的、集各窑之大成于一体的景德镇窑，无一不是以颜色釉瓷、彩绘瓷或雕塑陶瓷而著称于世，使我国陶瓷科学和艺术的辉煌成就达到历史的高峰。它们共同形成了我国陶瓷科学技术史的第五个里程碑。三大技术突破是：①原料的选择与精制。

②炉窑的改进和烧成温度的提高。③釉的形成与发展。其中根据瓷釉的化学组成、显微结构和外观,把中国瓷釉的形成和发展分成4个阶段:(i)商前时期,釉的孕育阶段;(ii)商周时期,釉的形成阶段;(iii)汉、晋、隋唐、五代时期,釉的成熟阶段;(iv)宋到清代,釉的发展阶段。综上所述可以看出,中国古陶瓷工艺技术发展中的五个里程碑是通过三个重大技术突破而实现的。正是由于有了这五个里程碑才使中国成为世界上最早发明瓷器的国家,才使中国具有连续不断,长达万年,世界上独一无二的中国陶瓷工艺技术发展史,才使中国古陶瓷工艺技术和艺术在世界上一直处于领先地位,一直延续到18世纪末的清代中期。中国古陶瓷科学技术研究的目的就在于揭示古陶瓷科学和艺术的丰富内涵,弘扬中华文化,为再度创造中国陶瓷辉煌的未来做我们应做的努力。

尽管如此,上述对中国古陶瓷科技发展史的论述是用粗线条勾画的轮廓,侧重于古陶瓷的工艺、配方等方面的研究,此外还需要对中国古陶瓷发展的内在动力、客观原因以及当时的经济、政治、文化等进行系统的研究,特别是古陶瓷的窑口(产地)的确定、制瓷技术的发展和不断创新等方面的研究,才能体现中国古代辉煌的科学技术成就^[3]。

1.2 中国古陶瓷研究的目的和意义

陶器是新石器时代最主要的物质遗存,古陶产地的研究是科技考古学的一个重要研究领域^[4]。陶器是划分考古学文化区系和类型的重要依据,传统考古学利用陶器器型分类学已取得了显著的成果,用科学的分析手段揭示不同陶器在产地等方面的异同,可以为不同考古学文化区系和类型的划分及其相互交流提供量化的依据。在同一考古学文化区系范围内,不同遗址出土的陶器之间也有一定的传播和交流关系,甚至在同一遗址的不同地点出土的陶器也存在陶器交换现象。由于陶器文化性质的相似,在传统考古学上很难区别不同产地的陶器。古陶产地的科学研究可以为此提供许多定量的信息,进而有可能对不同聚落的社会结构提供一些有价值的信息。科技考古理论更需要系统

的基础研究，日本考古界关于陶器内稻作硅酸体的系统分析，是早期的科技考古理论工作之一。日本考古界将其作为判别弥生文化和绳文文化的主要依据。日本科技考古与考古界分析了日本全国各文化层出土陶器的稻作硅酸体，研究了稻作在日本国土的起源和传播路线，以此为基础，建立了这一新理论。我国历史悠远，国土远比日本辽阔，可建立新的考古理论，如建立不同地区、不同遗址出土陶器的微量-痕量元素、岩相和同位素比值的基础数据库，以此作为划分考古文化区系的理论依据^[5]。古陶保存了许多有关古代黏土矿等原料的成分、矿物结构等方面的信息，黏土矿又是在古代自然环境中形成的，所以古陶产地和矿料来源的研究可以为古环境的研究提供难得的内容。

中国有很多古陶瓷窑口，虽然传统的考古学对这些窑口的变化规律的研究已经取得了很大的成绩，但是对于中国古陶瓷的研究存在的若干疑难问题，例如不同产地古陶瓷的配方和用料的变化、制造技术之间的相互影响和传播、典型古窑口的兴起和衰落以及与此相关的政治、经济、文化以及这中间蕴藏的中国古代灿烂的文化和艺术仍然需要用科学技术手段来进行研究。目前，对具有重大考古意义的万年前后的陶片研究甚少，山东大汶口等原始文化的渊源关系不明确，具有重要年代特征的古陶缺乏系统研究，一些著名窑系的创烧年代还未确定，有些著名古陶瓷的材料来源、窑变机制和着色机理等仍未解决，秦兵马俑的烧造之谜仍未揭开，原始瓷和唐三彩的产地以及中国北方东汉至唐这个时期的古陶瓷研究还存在诸多空白点^[6]。此外，何为原始瓷？有没有原始瓷？如有，如何限定原始瓷与青瓷？如没有，又如何认识瓷器的起源？还有青瓷与白瓷的关系，有无继承关系？这里涉及到高岭土和瓷土的产地，高岭土能否直接烧制瓷器等一系列关键问题。再有，影青瓷和白瓷的关系，斗彩、五彩、粉彩、珐琅彩等制作工艺。如此等等，不一而足^[7,8]。

1.3 古陶瓷产地的研究方法及其判别的途径

古陶瓷是由古代陶土或瓷土烧结而成。地球化学理论，岩石和矿物总是带着某些产地的特殊信息，这是由形成岩石和矿物的条件决定

的。陶土或瓷土经过加工和烧结成为陶瓷器的过程中，经过复杂的物理和化学等变化，原料的部分信息仍然保留在古陶器中，形成了自然科学和人文科学工作者都认可的“指纹”元素，如同人的指纹一样，古陶器是携带着产地的指纹信息。指纹信息就是古陶器中的主量元素、痕量元素、微量元素的种类和含量及其变化规律，包括同位素比值和微结构^[9]。以化学成分为基础的古陶瓷产地的概念最初在 20 世纪 70 年代由学者 Bieber 等在 1976 年、Harbottle 等在 1976 年、Perlman 和 Asaro 在 1969 年和 Sayre 在 1971 年分别提出，但是直到 1977 年才由 Weigand 等人首次明确阐述“there exist differences in chemical composition between different natural sources that exceed, in some recognizable way, the differences observed within a given source”，并认为可以通过产地的分析来追溯文物的来源。Weigand 等人所阐述的内容^[10]今天被考古学家定义为文物的产地。文物的产地一般可以理解为：用不同区域原料制造的古器物，其原料在化学成分上的差异远大于用同一区域里原料制造的古器物，因此可以通过其化学成分的分析来判断其来源。按照 Michael D Glascock 和 Hector Neff 的观点可以通过两种途径来判断古器物的产地，其判断的流程图如图 1.1。根据化学成分来判断古器物的年代，由于其制造原料来自同一区域，化学成分的差别相对较小，但其判别方法与判别产地的第二种途径很类似。

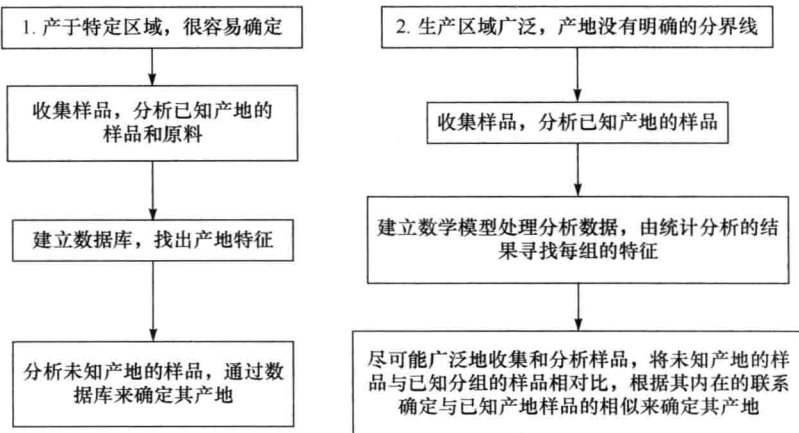


图 1.1 研究文物产地的两种途径

按照 Lahanier 等人的观点^[11], 理想的研究艺术、历史和考古等样品的分析技术应该满足下要求: ①珍贵的有价值的物品不能在分析中造成任何可见的损伤(non-destructive); ②要分析大量相似的样品或者分析同一样品的许多不同位置, 要求快速分析(fast); ③分析方法最简单, 样品不需要进行前处理, 能分析不同质地、不同形状的样品以及不同维度的元素分布等(universal); ④同一种分析方法既能分析样品的平均组成也能进行样品的微区成分的分析(versatile); ⑤一种分析方法不仅能通过分析样品中主量元素的含量, 而且还可以通过分析样品中微量元素的含量来进行分组和产地的判别(sensitive); ⑥一次能测量样品中多种元素, 得到样品内在的信息(multi-elemental)。

古陶瓷是由古代的土壤和岩石经过加工而成的, 从理论上来说, 所有适用于分析材料的成分和结构的分析手段都可以应用于古陶瓷的研究, 但由于核分析方法独特的优点和古陶瓷分析的本身对分析方法的要求决定了核分析方法在研究古陶瓷中具有不可替代的作用, 常见的用于古陶瓷成分研究的核分析方法一般包括中子活化分析(NAA)、X 射线荧光分析(XRF)、同步辐射 X 荧光分析(SRXRF)和质子激发 X 荧光分析(PIXE)等, 本书将在有关章节逐个介绍每种核分析方法的原理及其在古陶瓷研究中的应用。

1.4 国内外科技研究古陶瓷的现状

早期的传统考古学家主要是根据考古的层位学和器型学来解决古陶瓷的年代、空间分布范围、生产地点和矿料来源等。随着美国科学家 W. F. 利比于 1949 年关于放射性碳素测定年代方法的建立, 断代测年方法及其应用在过去 50 年里成为考古学和科技考古学研究中一个经久不衰的热点。相对而言, 文物产地研究由于其复杂性和艰巨性, 一直没有得到应有的重视。

由于分析技术, 尤其是核分析技术的改进和日益完善, 陶瓷产地的研究工作开始活跃起来, 逐渐形成科技考古的一个热点。仅以 1996 年 5 月在美国 Illinois 大学召开的国际第三十届科技考古学术研讨会为

例,有关古陶瓷的产地、矿料的来源等研究报告,就占大会全部报告的43%。美国 Brookhaven 等国家实验室都设有文物产地研究项目,每年测试3000多个样品才能勉强满足这一研究需要。

经过我国科学工作者近半个世纪的不断努力,中国古陶瓷胎、釉的主量元素数据库已初步建成。到20世纪80年代初人们逐渐认识到建立古陶瓷胎、釉微量元素的数据库,对古陶瓷产地(窑口)的精确鉴定及其原料来源的研究都有着重要作用。把不同窑系和生产年代的样品按元素在胎(釉)中的含量和分布规律列出谱系,那么,用它来判别某件(片)瓷(陶)器时就有了科学依据。国内以中国科学院上海硅酸盐研究所周仁和李家治教授为代表的科学家对中国不同产地和年代的古陶瓷进行了主量元素的分析,但是缺乏对微量元素的分析。随着现代分析技术的发展,对古陶瓷的研究逐渐转向微量元素的研究,并且取得了显著的成果。中国科学技术大学王昌燧教授等人用中子活化分析等分析技术研究了新石器时代西山和贾湖遗址古陶,得出了贾湖聚落的制陶业可能处于家庭作坊阶段,而西山城址的制陶业可能已出现了较为集中的作坊阶段,并对秦始皇陵兵马俑的原料以及烧制方式进行了研究;中国科学院上海硅酸盐研究所吴瑞等对江西万年仙人洞遗址出土的陶片进行了分析,陶光仪研究员用X射线荧光光谱分析技术对中、南美洲的古陶进行了分析。中国科学院上海硅酸盐研究所定期主办的古陶科学技术研究讨论会,发表了中国古陶瓷研究的大量成果^[12]。

中国科学院高能物理研究所核分析实验室用多种核分析方法系统地研究了浙江越窑^[13]、江西洪州窑^[14]等窑口不同年代和产地的古瓷中多种主、微量元素的变化规律,研究了唐三彩的产地^[15]、河北白瓷的产地特征等,并积极进行中国古陶瓷数据库的建设,这将会将中国古陶瓷的研究发挥积极的作用。

参 考 文 献

[1] 李家治. 中国科学技术史(陶瓷卷), 北京: 科学出版社, 1998, 10.

[2] 李家治. 中国早期陶器的出现及其对中华文明的贡献, 原始农业对中华文明形成的影响.

- CCAST-WL WORKSHOP SERIES; VOLUME 128, Beijing, P. R. China, 2001, 15-17; 17-22.
- [3] 刘毅. 关于中国古陶瓷研究的几点思考. 考古与文物, 2000, 4: 72-78.
- [4] 王昌燧. 文物产地研究的发展简史—兼论科技考古与 Archaeometry. “科技考古论丛”第二辑. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000: 13-17.
- [5] 刘新园, 白焜. 景德镇湖田窑考察纪要. 文物, 1980, 11: 39-47.
- [6] 冯松林, 徐清, 冯向前, 等. 核分析技术在古陶瓷中应用研究. 原子核物理评论, 2005, 22(1): 131-134.
- [7] 程琳, 冯松林. 陕西古琉璃和江西湖田窑古瓷的核分析研究. 中国科学院博士论文, 2005, 1-5.
- [8] 王昌燧. 蓬勃发展的科技考古学. 中国科学基金, 2009, 3: 139-144.
- [9] 冯松林. 用核分析技术研究史前陶器的区系特征和技术传播. The Influence of Agriculture Origin on Formation of Chinese Civilization—Proceedings of CCAST(World Laboratory) Workshop, 2001, 会议论文.
- [10] Michael D. Glascock, Hector Neff. Neutron activation analysis and provenance research in archaeology. Meas. Sci. Technol, 2003, 14: 1516-1526.
- [11] Ch. Lahanier, F. D. Preusser, L. Van Zelst. Study Aan Conservation of Museum Objects; Use of Classical Analytical Techniques. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 1986, 14: 1-9.
- [12] 郭景坤. 02' 古陶瓷科学技术国际讨论会论文集. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- [13] 范东宇. 浙江寺龙口及其他典型瓷窑青瓷的核分析研究. 中国科学院研究生院博士论文, 2003.
- [14] 冯向前. 用核分析方法研究中国若干典型名窑古瓷. 中国科学院研究生院博士论文, 2002.
- [15] 雷勇. 不同产地唐三彩的核分析研究. 中国科学院研究生院博士论文, 2004.

第 2 章 中子活化分析

活化分析作为一种核分析方法，它的基础是核反应。该方法是用一定能量和流强的中子、带电粒子或者高能 γ 光子轰击待测试样，然后测定核反应中生成的放射性核衰变时放出的缓发辐射，或者直接测定核反应中放出的瞬发辐射，从而实现元素的定性和定量分析。活化分析通常包括中子活化分析(neutron activation analysis, NAA)、带电粒子活化分析(charged particle activation analysis, CPAA)、光子活化分析(photon activation analysis, PAA)等。其中 NAA 具有下列优点：

- (1) 极佳的灵敏度、精密度和准确度；
- (2) 多元素分析；
- (3) 免除了试剂的空白；
- (4) 不受基体元素的干扰；
- (5) 非破坏性样品分析。

因而，NAA 成为测定环境、地学、考古学、生物样品中微量元素含量的主要方法^[1~3]。本章只简单介绍中子活化分析在古陶瓷领域中的应用研究。

2.1 中子活化分析的原理

核反应用于元素的定量分析首次由 Georg Hevesy 和 Hilde 在 1936 年提出，他们发现含稀土元素的混合物被 Ra(Be)放射源照射后，大部分稀土元素具有很高的放射性，可以通过测量它们的半衰期和放出的射线强度来确定它们在混合物中的含量。中子活化分析应用于古陶瓷研究最早是在 1954 年秋天，Brookhaven 国家实验室(BNL)学者 Robert Oppenheimer 建议 Dodson 和 Sayre 用中子活化分析研究古陶瓷的产地，实验工作由 Sayre 主持，并于 1956 年在普林斯顿大学将分析结果以报告的形式报告给考古学家和化学家。几乎与此同时，牛津

大学的一个研究小组开始用中子活化分析来分析古陶器和古钱币，初始的实验因为探测系统的分辨率低而进展缓慢，随着 20 世纪 60 年代锗锂探测器分辨率的显著提高，引起了活化分析在考古学中应用的热潮。值得一提的是，Sayre 在 1965 年发表了第一篇关于锗锂探测器用于活化分析研究古玻璃成分的论文。从本质上说，活化分析的基础是核反应。该法是用一定能量和流强的中子(包括热中子,共振中子和快中子等)、带电粒子(质子、氘子、氦-3、氦-4 以及重离子等)或者高能 γ 光子轰击待测试样，然后测定由核反应生成的放射性核素衰变时放出的缓发辐射或者直接测定核反应过程中放出的瞬发辐射，从而实现元素的定性和定量分析^[3]。中子活化分析的发展史和它在自然科学中的应用已经在文献^[3]中作详细的介绍。下面对中子活化分析在古陶瓷研究中的应用作一简单地介绍^[3,4]。

中子活化分析需要中子源和相应的探测 γ 射线的设备，活化分析中一般利用中子的俘获(n, γ)反应，中子通过非弹性碰撞与靶中的原子核相互作用形成处于激发态的复合核，复合核随即退激到处于稳定的新状态，同时发出特征瞬发 γ 射线。一般情况下，处于新状态下的核也通过发出特征缓发 γ 射线进行衰变，但它是通过自身半衰期的速度进行衰变。中子俘获和衰变过程如图 2.1 所示。根据核素的种类不同，其半衰期在几分之一秒到几年之间变化。

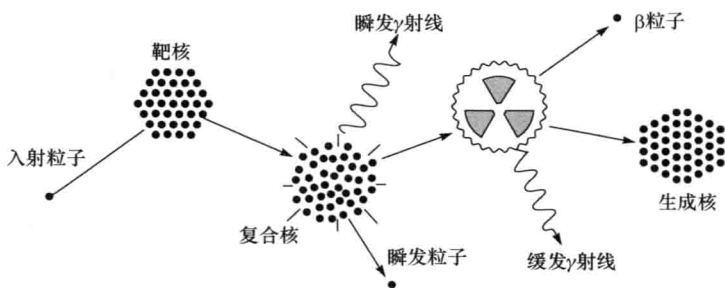


图 2.1 靶核的中子俘获反应和随后的发出 γ 射线过程图

总的来说，根据核素放出特征 γ 射线的时间上的差异，中子活化分析分成两大类，第一类是样品的在线测量，称为瞬发 γ 中子活化分

析(PGNAA), PGNAA 适用于测量轻元素或活化截面比较大的元素, 例如 H、B、C、N、S、P、Hg、Cd 和 Gd 等。国内目前在中国原子能科学研究院正在建立第一个 PGNAA 实验室^[5]。第二类是样品中核素已经被活化处于激发态的原子核衰变时测量, 称为缓发 γ 中子活化分析(DGNAA)。后者的应用比较普遍, 如果没有特别说明, 当提到中子活化分析时一般指缓发 γ 中子活化分析, 大约 70% 元素适合于缓发 γ 中子活化分析。用于活化分析的中子源可以通过几种途径(如反应堆、加速器、放射源等)来产生, 核反应堆用 U 核的裂变来产生较高的中子通量, 因而对大多数元素有很高的灵敏度。尽管在不同类型的核反应堆, 甚至在同一核反应堆的不同位置, 中子的能量和中子通量的分布不同, 但基本都是由热中子通量(thermal flux)、超热中子通量(epithermal flux)和快中子通量(fast flux)三部分组成, 如图 2.2 所示。一般采用常规的中子活化分析, 在测量时间上等短寿命的核素衰变完毕后再测量长寿命的核素来减少它们之间的干扰进而提高其分析的灵敏度, 这种在测量时间上的选择性是中子活化分析优越于其他分析方法的关键地方。中子活化分析的测量系统一般由自动换样机、高纯 Ge 探测器、由计算机控制的采谱程序和解谱程序等组成, 样品不经过化学处理可以同时测量三十多种元素, 也被称为仪器中子活化分析(INAA)。样品不经过化学处理就可以求得样品中各元素的含量, 这也是它优于其他分析方法的另一个地方。

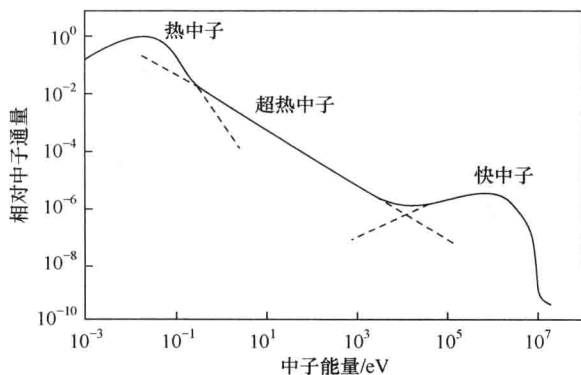


图 2.2 核反应堆中三种中子能量的分布图

古陶瓷样品基本上是由 Si、O、Al 等半衰期很短的元素组成的基