

临床心肺核医学

北京医科大学

74
KJ
2

联合出版社

临床心肺核医学

刘秀杰 马寄晓 主编

北京医科大学中国协和医科大学联合出版社

临床心肺核医学

刘秀杰 马寄晓 主编

北京医科大学
中国协和医科大学 联合出版社

[京]新登字 147 号

内 容 简 介

本书由中国医学科学院阜外医院及上海第六人民医院刘秀杰、马寄晓等国内外 16 位专家编写的一部心肺临床核医学专著,全书共 20 章,包括了核医学的理论基础、核物理学以及核医学显像仪器 SPECT、PET 等,电子计算机在核医学的应用、放射性药物、核心脏病学诊断检查方法,如核素心室造影、心肌显像、正电子断层显像等技术,核素显像在肺部疾病的应用,如肺灌注显像、肺通气显像等,单克隆抗体显像在心、肺疾病的应用等,全书本着求新、实用、先进的编写宗旨在上述各领域作了深入浅出的介绍。

临床心肺核医学

刘秀杰 马寄晓 主编

责任编辑:陈永生

*

北京医科大学 联合出版社出版
中国协和医科大学

四方计算机照排中心排版

北京昌平精工印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 1/16 印张 23.5 千字 579

1993 年 12 月第一版 1993 年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—2000

ISBN 7-81034-346-7/R·346

定 价: 29.00 元

编写委员会

主 编

刘秀杰 研究员 中国医学科学院阜外医院

马寄晓 教 授 上海第六人民医院

编 委

(按姓氏笔划为序)

马寄晓	上海第六人民医院
王学斌	北京师范大学
王彦群	中国医学科学院阜外医院
J. S. Borer	美国纽约医院和 Cornell 医学中心
J. Maublant	法国 Centre Jean Perrin
D. Jain	美国耶鲁大学
史蓉芳	中国医学科学院阜外医院
朱瑞森	上海第六人民医院
刘蕴忠	中国医学科学院阜外医院
刘秀杰	中国医学科学院阜外医院
吕 斌	中山医科大学附属二院
吕 萍	中国医学科学院阜外医院
何作祥	中国医学科学院阜外医院
陈盛祖	中国医学科学院肿瘤医院
张金谷	北京朝阳医院
张 正	中国医学科学院阜外医院
张卫和	中国医学科学院阜外医院
唐 谨	中国医学科学院肿瘤医院
徐家麒	上海第六人民医院
蒋茂松	上海华东医院

序

近年来某些心血管病如冠心病与高血压的发病率有明显增高的趋势，心血管疾病已成为我国严重危害人民健康的主要疾病之一，因此，心血管疾病的防治是一个重要课题。核医学由于具有无创伤性，易于重复检查，结果准确可靠，更由于它能反映脏器功能、代谢的优势，在心血管疾病的应用也日益普及，当前核心脏病学已发展成为核医学的一个重要分支。心与肺有不可分割的关系，肺部疾病可影响到心脏，同样，心脏疾病也影响到肺循环及肺功能，作者将两者联系在一起写，正是考虑到心、肺不可分的病理生理与临床的特点。

本书全面而系统地介绍核心脏病学、肺脏核医学涉及的各个方面，如核素心血管造影，左、右心室功能测定、分流量及返流量测定，心肌显像、肺灌注、通气显像等，各章均从原理、技术操作、结果分析及临床意义作了详细描述。

本书的作者具有丰富的临床实践经验，尤其在核心脏病学及核素诊治方面都作出过不少独特的贡献。书的内容主要为国内经验的总结，也介绍了国外的先进技术与经验，使其尽量适合于我国的临床心血管医师、核医学医师阅读参考，并反映了当前这些领域在国际上的水平与进展。有些新技术如单光子发射型计算机断层（SPECT）、正电子发射型计算机断层（PET）、放射性药物以及电子计算机等作了专门介绍，不仅对临床诊断检查有帮助，而且对应用这些新技术作科研工作也是一部不可多得的优秀参考书。

王世真

中国协和医科大学教授

中国科学院院士

CLINICAL NUCLEAR MEDICINE IN CARDIOVASCULAR AND PULMONARY DISEASES: AN INTRODUCTION

During the past twenty years, numerous technical advances have enriched the capacity to evaluate and treat patients with cardiopulmonary diseases. Multiple imaging techniques, coronary angioplasty, cardiac valve repair, and a variety of insights at the cellular and molecular level have developed during this period. Among the most important of these developments, however, has been the clinical application of radioisotopes in patients with heart and lung disorders. Radioisotope-based modalities have permitted accurate and noninvasive evaluation of heart and lung function, of many important structural characteristics of these organs, of coronary and pulmonary vascular flow patterns and, most recently, of complex cellular biological phenomena, as elucidated by antimyosin antibody imaging, cardiac receptor imaging, and parallel techniques. Given the rapid rate at which such data have been collected, the need for an up-to-date, comprehensive text is obvious.

"Clinical Nuclear Medicine in Cardiovascular and Pulmonary Diseases," edited by Drs. Liu and Ma, provides such a text. The volume carefully describes the physical basis and instrumentation underlying the clinically applied techniques, reviews the important role of the computer, and provides a primer on radiopharmacology. In addition, this ambitious volume describes the technical characteristics of all testing modalities currently applied clinically and provides important data regarding interpretation of the results of testing.

It is appropriate that such a text should be produced in China. This effort provides formal recognition for the growing importance of Chinese physician/scientists in the development and progress of nuclear medicine. The increasingly valuable contributions of these investigators has been apparent to those working in the field for several years; with the production of a definitive text, Chinese experts will take their rightful place on the global stage as the field moves forward.

In addition, the focus of the book on cardiovascular and pulmonary nuclear medicine has an important historical basis within the context of medical development in China. Thus, 3,000 years ago, the Neiching revealed that the heart was the seat of the spirit and the lungs, the source of energy. In the resulting hierarchical system, the heart was king and the lungs were its chief executors. As a cardiologist, I must admit to considerable bias, but nonetheless I believe this classification remains essentially correct. Moreover, 400 years after the Neiching, Pien Ch'iao established the importance of the pulse, derived from the heart, as a source of information regarding health status. This volume, then, updates and extends these early observations by describing the most advanced techniques for objective evaluation of the heart and lungs, and by elucidating and evaluating current thinking on the interpretation of data derived from such testing to provide crucial information regarding health status. All of us who employ radioisotope-based techniques in cardiopulmonary

medicine are enriched by the efforts of Drs. Liu and Ma and their contributors in producing such a much-needed compendium.

Jeffrey S. Borer, M. D.

Gladys and Roland Harriman Professor of Cardiovascular Medicine

and

Professor of Cardiovascular Medicine in Radiology

Cornell University Medical College

New York, NY 10021

U. S. A

前 言

近年来,随着核医学仪器和放射性药物的发展,核医学的临床应用也有了新的进展,为了适应新形势的需要,70年代以来,我国先后出版了几种临床核医学著作,如科学出版社出版的《核医学与核生物学》、原子能出版社出版的《实用临床核医学》,受到了广大核医学工作者及有关专业人员的欢迎,但随着临床核医学应用的不断深入与发展,特别是心血管核医学的迅速发展,这种全面的核医学书籍的问世,已不能满足某些专业人员的需要。1993年在法国康城(CANNES)召开了第一届国际心脏病学会(First International Congress of Nuclear Cardiology),与会代表1300名,代表23个国家,并成立了美国心脏病学会(American Society of Nuclear Cardiology),出版了《心脏病学杂志》(Journal of Nuclear Cardiology)。我国的心脏病学也在蓬勃发展,成为核医学的一个重要组成部分。为了满足核医学工作者、心脏专科医师以及进修生、研究生的需要,我们组织了国内清华大学、北京师范大学、中山大学、上海第六人民医院、华东医院、中国医学科学院阜外医院和肿瘤医院、北京朝阳医院等单位的专家以及部分国外专家,撰写了《临床心肺核医学》,我们本着求新、求实的精神,力求将本专业国内成熟了的先进经验和国外的最新进展介绍给读者,但由于水平有限,书中不够完善,甚或错误之处,在所难免,敬请读者给以批评指正。

本书承许多专家教授提出宝贵意见,得到上海市第六人民医院和中国医学科学院阜外医院领导和同志们的大力支持,在此,谨致诚挚的感谢。

刘秀杰 马寄晓

目 录

基 础 篇

第一章 核物理与核仪器	(1)
第一节 物质结构.....	(1)
第二节 放射性.....	(3)
第三节 射线与物质的相互作用.....	(7)
第四节 放射性测量和放射性的统计误差.....	(8)
第五节 发射型计算机断层.....	(11)
第六节 正电子发射型计算机断层.....	(25)
第二章 电子计算机与心肺核医学	(29)
第一节 计算机的基本知识.....	(29)
第二节 核医学设备中的计算机.....	(36)
第三节 计算机在心肺核医学中的应用.....	(45)
第四节 计算机技术的进展与未来.....	(49)
第三章 放射性药物	(53)
第一节 放射性药物的基本知识.....	(53)
第二节 心血管显像剂.....	(61)
第三节 放射性药物的质量控制.....	(68)
第四章 ^{201}Tl 及 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记的心肌灌注显像剂的生理学基础	(73)
第一节 心肌灌注的病理生理学.....	(73)
第二节 理想的核素心肌血流灌注显像剂.....	(78)
第三节 铊-201 和锝-99m 标记的化合物	(80)
第四节 心肌显像的新进展.....	(84)
(附英文原文)	(86)
第五章 核素心室造影	(104)
第一节 首次通过法核素心室造影.....	(104)
第二节 平衡法核素心室造影.....	(111)
第三节 门电路心血池断层显像.....	(120)
第四节 非显像法核素心室造影.....	(127)
第六章 心肌显像	(133)
第一节 心肌灌注显像.....	(133)
第二节 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ —焦磷酸盐亲心肌梗塞显像	(143)
第三节 抗肌凝蛋白单克隆抗体显像.....	(148)
第四节 心脏神经受体显像.....	(152)

第七章 介入性心脏病学	(156)
第一节 运动试验.....	(156)
第二节 潘生丁试验.....	(160)
第三节 腺苷试验.....	(162)
第四节 多巴酚丁胺试验.....	(164)
第八章 正电子发射型计算机断层显像	(167)
第一节 PET 的基本原理	(167)
第二节 放射性药物.....	(168)
第三节 临床应用.....	(172)
第九章 肺灌注显像	(203)
第一节 肺灌注显像的原理.....	(203)
第二节 肺灌注显像剂.....	(205)
第三节 肺灌注显像的方法.....	(206)
第四节 肺灌注显像的定性定量分析.....	(211)
第五节 呼吸门电路显像.....	(214)
第十章 肺通气及其它显像	(216)
第一节 肺通气显像的基本原理.....	(216)
第二节 ^{133}Xe 肺通气显像方法	(217)
第三节 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA 肺吸入显像方法	(218)
第四节 Technegas 肺通气显像	(219)
第五节 呼吸道纤毛运动显像方法.....	(220)
第六节 肺上皮细胞通透性测定.....	(221)
第七节 放射性核素下肢静脉造影.....	(222)

应 用 篇

第十一章 冠心病的应用	(227)
第一节 冠心病的诊断.....	(227)
第二节 冠状动脉解剖狭窄病理、生理意义的评估.....	(235)
第三节 对冠状动脉病变程度的估价.....	(238)
第四节 对冠心病预后的估价.....	(240)
第十二章 核素检查在急性心肌梗塞的应用	(243)
第一节 心肌再灌注的病理生理.....	(243)
第二节 核素在急性心肌梗塞诊断上的应用.....	(244)
第三节 急性心肌梗塞范围的估测.....	(250)
第四节 急性心肌梗塞左心功能的测定.....	(253)
第五节 核素检查在 AMI 病人溶栓疗法中的作用	(254)
第十三章 冠状动脉搭桥术及冠状动脉成形术的核素检查	(257)
第一节 核素心室造影估价冠心病病人左心功能的变化.....	(257)
第二节 门电路心血池断层显像的意义.....	(261)

第三节	心肌灌注显像对 CABG 的评价	(263)
第四节	心肌灌注显像对 PTCA 的疗效评价	(265)
第五节	核素对心肌存活的估价	(268)
第十四章	放射性核素在瓣膜病中的应用	(272)
第一节	心脏瓣膜的解剖与生理	(272)
第二节	核素心室造影对瓣膜疾病的诊断价值	(273)
第三节	门电路心血池断层显像在瓣膜病中的应用	(278)
第四节	核素检查在瓣膜置换术中的应用	(280)
第十五章	心肌病、心律失常	(284)
第一节	心肌病分类	(284)
第二节	心肌病的核素检查	(285)
第三节	位相分析在心律失常诊断中的应用	(289)
第十六章	核素检查在先天性心脏病的应用	(294)
第一节	首次通过法核素心室造影的临床意义与限制	(294)
第二节	定量肺灌注显像对先心病肺动脉高压的估测	(298)
第三节	心肌断层显像的意义	(298)
第十七章	核素检查在肺血管病的应用	(300)
第一节	肺动脉系畸形的诊断	(300)
第二节	肺动脉血栓栓塞症	(301)
第三节	大动脉炎肺血管受累	(308)
第四节	核素检查对肺动脉高压的诊断	(309)
第十八章	慢性阻塞性肺部疾病	(312)
第一节	肺灌注显像与通气显像的特点	(312)
第二节	核素肺功能测定	(314)
第三节	肺灌注显像与肺动脉高压的关系	(318)
第四节	肺心病人左右心功能的改变	(321)
第五节	肺心病心肌显像的特点	(327)
第十九章	肺部肿瘤的放射核素诊断	(332)
第一节	亲肿瘤药物及其显像诊断	(332)
第二节	肺灌注和肺通气显像在肺部肿瘤中的应用	(336)
第三节	放射免疫测定在肺部肿瘤的应用	(336)
第四节	放射免疫显像	(337)
第五节	PET 的临床应用	(339)
第六节	今后的展望	(340)
第二十章	展望与进展：动态监测左心功能的新进展	(342)

第一章 核物理与核仪器

第一节 物质结构

了解物质结构对研究放射性的产生以及射线与物质的相互作用十分重要。从研究放射性和放射性核素的角度出发，了解原子核的结构更为重要，因为放射性的产生和射线与物质的相互作用均发生在原子核的范围内。

一、物质结构

物质由分子组成，分子代表了物质的基本属性。分子由原子组成，各种分子的性质由组成它的原子及其结合方式决定。原子由原子核和原子核外的轨道电子组成。不同的原子核及其不同的轨道电子排列决定了原子的不同性质。原子核由质子和中子构成，统称核子。截止1970以前，这是物质可以分成的最小微粒。但1970年人们发现核子还可以分裂成更小的微粒，称为夸克。夸克是否就是最小微粒，仍有待进一步探讨。

二、几种基本粒子的性质

在研究原子核结构和放射性的衰变过程中，经常遇到以下几种基本粒子，其基本性质列于表1-1。

表 1-1 几种基本粒子

粒 子	电荷	质量 (U)	能量 (MeV)
质子 (Proton)	+1	1.007593	938.221
中子 (Neutron)	0	1.008982	939.505
电子 (Electron)	-1	0.000548	0.511

一个电荷单位相当于 1.602×10^{-19} 库仑。质量单位 U 在后面还会提到，它不用克表示，用原子质量单位表示。基本粒子的能量是通过质能关系转换来的。

三、原子及原子的能级

原子和原子核都有一定的能级。原子核外的轨道电子能紧密地被原子核束缚住依靠的是原子的结合能，这是一种电场结合能。原子核的正电荷数越大（原子序数越大），结合能也越大。轨道电子的壳层结构呈由内向外排列，内层轨道电子比外层轨道电子稳定，结合能大。要把壳层电子从原子内拉出去需要外力做功。例如用高速电子或光子去撞击壳层电子。每一壳层上电子具有的能量是固定的，壳层之间的能量差也是固定的。通常用能级图表示电子能量，而把壳层电子看成轨道电子。实际上，壳层和轨道都是虚设的，真实含义是代表不同的电子能量。图 1-1 是碘原子的能级图。

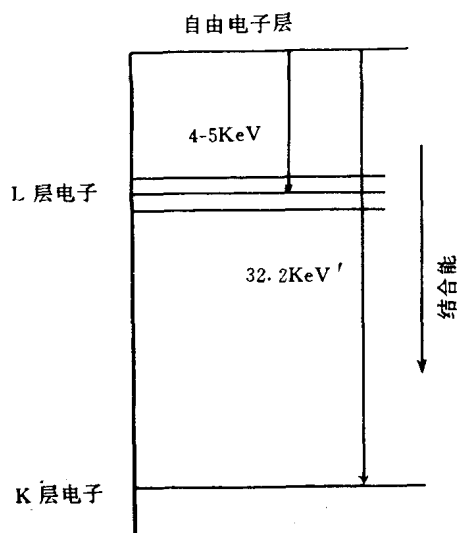


图 1-1 碘原子的能级图

轨道电子从低能级跳至高能级（从内层轨道跳至外层轨道）需要吸收外界能量；轨道电子从高能级跳至低能级（从外层轨道跃迁至内层轨道）要释放能量。

原子核与原子有类似情况，原子核内的核子也具有一定能态。原子核内的核子聚合在一块靠两种结合能。一种叫库仑力或电场力，它是由原子核内带正电的质子产生的。另一种叫交换力。交换力把质子间的排斥力紧紧控制在一块，而使核子不易跑出原子核外。如有外力做功，克服了核力的影响，原子核中的核子仍然可以跑出核外或进入不稳定的能态。原子核中的核子处于不同的能态代表原子核处于不同能态。例如，核子处于稳定态称原子核处于基态（Ground state），核子处于不稳定状态则称原子核处于激发态（Excited state）。还有一种状态叫亚稳态，亚稳态与基态不同，也是一种不稳定状态，只是它回复基态的时间较长而已。亚稳态又叫同质异能态。 ^{99m}Tc 就是一个典型的亚稳态原子核。

四、元素的表示方法

元素通常用以下符号表示 $^A_Z\text{X}_N$ 。X 表示化学元素，如氧、碳、钠等。A 代表原子量。原子量包括质子、中子和电子的质量和。但通常在符号表示上 A 仅代表元素或核素中质子数和中子数之和。Z 代表原子序数。原子中的核电荷数或轨道电子数表示其原子序数。N 代表中子数，它可由 $A-Z$ 得到，一般在表示中可省略。例如 $^{131}_{53}\text{I}_{78}$ 代表元素 I，有 53 个质子，78 个中子，原子量为 131。

元素符号用元素英文名字第一或第一、第二两个字母表示，或用缩写。如 H——Hydrogen，Al——Aluminum。

五、原子能

原子核分裂时释放出的能量称原子能。当原子核在外力作用下分裂时，母核分裂成许多子核碎片，同时释放出大量的能量。释放出的能量用质能关系转换成质量刚好等于母核与子核的质量差。质量能量的相互转化是物质不灭定律在原子核反应中的具体体现和应用。质能

关系用公式表示为：

$$E=mc^2$$

E 为能量，单位电子伏特 (eV)。

m 为质量，单位克 (g)。

C 为光速， 3×10^{10} cm/s。

根据公式计算，一克质量原子核转换成的能量为 10000MeV，这相当于 2.5×10^7 吨煤产生的能量总和。

原子能发电站就是利用原子能来发电的装置。1954 年世界建成了第一座原子能发电站。目前全世界有将近 400 座原子能发电站在工作，其发电量占总发电量的 15%。

六、几个名词的解释

元素：原子序数相同的一类原子。目前共有元素 109 种。

核素：有一定质子数、中子数和一定能态的一类原子。现有各种核素近 2000 种。例如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 、 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 都称为核素。

同位素：质子数相同，中子数不同的一类元素叫同位素。例如， $^{31}_{15}\text{P}$ ， $^{32}_{15}\text{P}$ ， $^{52}_{27}\text{Co}$ ， $^{53}_{27}\text{Co}$ ，…… $^{59}_{27}\text{Co}$ ， $^{60}_{27}\text{Co}$ ， $^{61}_{27}\text{Co}$ ， $^{62}_{27}\text{Co}$ 分别称为 P 和 Co 的同位素。核素与同位素的区别是核素包括了同位素。如， $^{32}_{15}\text{P}$ ， $^{32}_{15}\text{S}$ ， $^{31}_{15}\text{P}$ 都是核素，但仅 $^{31}_{15}\text{P}$ ， $^{32}_{15}\text{P}$ 是同位素。

核素与同位素都有稳定性和放射性两种。

同量异位素：A 相同，Z 不同。如 $^{32}_{15}\text{P}$ 、 $^{32}_{16}\text{S}$ 。

同质异能素：A 和 Z 均相同，能量不同，如 ^{99m}Tc 、 ^{99}Tc 。

第二节 放 射 性

一、放射性和放射线

1896 年法国物理学家 Becquere 在研究磷光时发现了放射性。为了纪念他的功绩，国际剂量单位将放射性活度的单位定为 Bq。

放射性是看不见，摸不着的，但它与电场、磁场一样是物质存在的一种形式，是一定质量的物质转化成能量的一种形式。

放射性通过放射线表现出来。放射线由若干种微粒组成，它既具有波动性，又具有微粒性。放射线可使胶片感光，皮肤发红，空气电离。在电磁场中有的射线还会发生偏转。利用放射线的这些性质，人们不仅可以探测放射性的存在，还可利用它来为人类服务。当然，放射性对人类也是有危害的，使用时应严格遵守操作规程，同时要注意加强必要的保护，几种常见的放射线的性质见表 1-2。

表 1-2 几种基本射线的性质

名称	符号	本质	电性	电离	防护
α 射线	α	氦原子核	+2	强	石蜡
β 射线	β	高速电子	-1	中	水，有机玻璃
γ 射线	γ	光子	0	弱	铅，混凝土
X 射线	X	光子	0	弱	铅，混凝土

光子流属于电磁辐射，遵从波动学说，根据波的长短，电磁辐射可从无线电波排到 γ 射线。它们的顺序是无线电波—红外线—可见光—紫外线—X 射线— γ 射线。

电磁辐射的能量与频率的关系可用以下公式表示：

$$E = h \cdot n \quad n = \frac{1}{\lambda}$$

n 为频率， λ 为波长， h 为普朗克常数，其值为 6.625×10^{-27} 。

从以上公式可以看出，光子流的频率越大，或波长越短，它的能量越高；波长越长，能量越低。

二、放射性核素

能产生 α 、 β 、 γ 射线的核素称放射性核素。这类核素均处于不稳定状态，它们在回复基态时发生衰变，产生 α 、 β 、 γ 射线。医学上常用的放射性核素列于表 1-3 之中。

表 1-3 几种常用放射性核素的性质

名称	射线	能量	半衰期	用途
^3H	$-\beta$	18.6keV	12 年	基础研究
^{14}C	$-\beta$	140keV	5760 年	基础研究
^{125}I	$(-\beta) \gamma$	28.32keV	60 天	基础研究
^{131}I	$(-\beta) \gamma$	364keV	8 天	临床
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	γ	140keV	6 小时	临床
^{32}P	$-\beta$	1.7MeV	14.3 天	临床
^{18}F	$+\beta$	22MeV	110 分	临床
^{11}C	$+\beta$	14MeV	20 分	临床
^{13}N	$+\beta$	1.2MeV	10 分	临床
^{15}O	$+\beta$	1.73MeV	2 分	临床

三、放射性的衰变

放射性核素随时间变化，其活度减小或放射性核的数目减少的过程称放射性的衰变。衰变是放射性核素的固有性质。衰变的结果，放射性核素释放出激发能转变成稳定的核素。

(一) 衰变规律 单个原子核的衰变是随机的，无规律的，大群原子核的衰变是有规律的。根据多次实验和观察，放射性的衰变遵从指数衰减规律。

$$I = I_0 e^{-\lambda t}$$

I_0 为衰变前的放射性活度， I 为 t 时刻的放射性活度， λ 为衰变常数。衰变常数表示放射性核衰变的几率，使用很不方便，在实际应用中常用半衰期 $T_{1/2}$ 与 λ 的乘积代入计算公式，它们的乘积为 $\lambda \cdot T_{1/2} = 0.693$ 。半衰期 $T_{1/2}$ 为放射性核衰变一半所需要的时间。

将 $T_{1/2} \cdot \lambda = 0.693$ 代入公式

$$\text{得 } I = I_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t}$$

由公式得知，只要知道半衰期 $T_{1/2}$ 和 I_0 ，即可求出任意时刻 t 的活度 I 。

最简单的办法是用计算器进行计算，这样可以自制核医学科内常用放射性核素的衰变表，

供使用时查对。用计算器计算时可查 e^{-x} 和 $(\frac{1}{2})^x$ 。在 e^{-x} 中，令 $X = \frac{0.693}{T_{1/2}} \cdot t$ ，在 $(\frac{1}{2})^x$ 中，令 $X = t/T_{1/2}$ 。在两种计算中均应注意 t 和 $T_{1/2}$ 的单位应取一致。

衰变公式的另一个应用是计算经过若干个半衰期后，放射性核素的活度还有原来的多少。这对于估算剂量防护及废物处理均有用处。

令 $t = n \cdot (T_{1/2})$ ， $n = 1, 2, 3, \dots$ 正整数

代入公式得：

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

$$n=1 \quad I = \frac{1}{2} I_0$$

$$n=2 \quad I = \frac{1}{4} I_0$$

$$n=5 \quad I = \frac{3}{100} I_0$$

$$n=10 \quad I = \frac{1}{1000} I_0$$

应用上述公式，还可鉴别 M_o-Tc 发生器中是否混有 $^{99}M_o$ 杂质。其检验过程如下：

(1) 取 ml ^{99m}Tc 淋洗液于试管中。

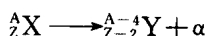
(2) 调节 γ 计数器的单道分析器，选峰为 140keV。

(3) 置试管于中型探头中，每 6 小时测 1 次，共测 6 次，依次计数为 $I_0, I_1, I_2, \dots, I_5$ 。

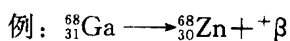
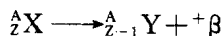
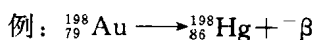
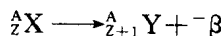
(4) 计算 I_5/I_0 ，并比较其值是否小于 1/1000，如果小于 1/1000，表示发生器中无钼的杂质，或其杂质含量小于 1/1000。若 $I_5/I_0 > \frac{1}{1000}$ ，则表示发生器中含有钼的杂质，如 $I_5/I_0 = 5/1000$ ，则表示发生器中钼的含量为 5/1000。

(二) 衰变类型

1. α 衰变：放射性原子核释放出 α 粒子， A 减少 4， Z 减少 2 的过程称 α 衰变。



2. β 衰变： β 衰变是由于放射性原子核中质子和中子的数目不平衡造成的。衰变过程中中子转化成质子，放出 $^{-}\beta$ 粒子，称 $^{-}\beta$ 衰变。质子转化成中子，放出 $^{+}\beta$ 粒子，称 $^{+}\beta$ 衰变。



3. 电子俘获：与 $^{+}\beta$ 衰变相竞争的衰变过程叫电子俘获。在 $^{+}\beta$ 衰变中，如果原子核的能量小于 1.02MeV，原子核可从轨道上俘获一个电子，实现质子转换成中子。电子俘获过程中除放出 $^{+}\beta$ 粒子外，还放出特征 X 线。

4. γ 衰变：伴随 α, β 衰变之后，放射性原子核还有多余能量，原子核从激发态跃迁到基态时释放出 γ 射线，称 γ 衰变。在 γ 衰变过程中，原子核的 A 和 Z 均保持不变。

5. 内转换：与 γ 衰变相竞争的过程叫内转换。处于激发态的原子核在回复基态时可以不

释放 γ 射线，而把多余能量传递给轨道电子，把轨道电子打跑。同样，内转换过程中也要放出特征 X 线。

(三) 衰变纲图 用图表形式表示放射性核素衰变过程叫衰变纲图。从衰变纲图中可以知道母核衰变成子核的详细过程。如衰变过程中产生射线的种类，百分比以及衰变时间等。图 1-2 是 ^{99}Mo — $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 发生器的衰变纲图。

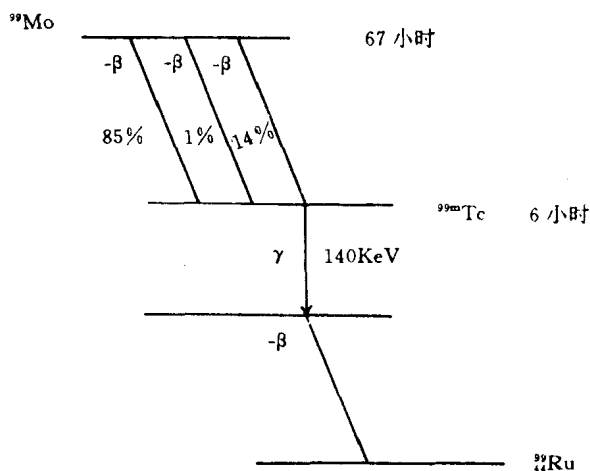


图 1-2 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的衰变纲图

四、放射性的单位

(一) 能量单位 能量用来表示放射性的穿透力的强弱，能量越高，放射线的穿透能力越强，能量越低，穿透能力越弱。能量的国际单位为电子伏特 (eV)。一电子伏特是一个电子在电场为 1 伏特电压下具有的能量。1 电子伏特太小，经常用它的 1000 倍，称千电子伏特 (keV) 或 1×10^6 倍，称兆电子伏特 (MeV) 表示。

$$1\text{MeV} = 1000\text{keV} = 1 \times 10^6\text{eV}$$

(二) 活度单位 放射性的活度有时又称强度，表示放射性的多少。国际单位为贝克勒尔 (Bq)。1Bq 放射性表示每秒 1 次衰变。

$$1\text{Bq} = 1 \text{ 次衰变/秒}$$

以往常用的活度单位还有居里 (Ci)

$$1 \text{ 居里} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 衰变/秒}$$

$$1 \text{ 毫居里} = 3.7 \times 10^7 \text{ 衰变/秒}$$

$$1 \text{ 微居里} = 3.7 \times 10^4 \text{ 衰变/秒}$$

这是一种旧的单位，将逐渐为 Bq 单位所替代，它们的转换：

$$1 \text{ 居里 (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3.7 \times 10^4 \text{ MBq}$$

$$1 \text{ 毫居里 (mCi)} = 3.7 \times 10^7 \text{ Bq} = 37 \text{ MBq}$$

$$1\text{Bq} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ 微居里 } (\mu\text{Ci})$$

$$1\text{MBq} = 27 \text{ 微居里 } (\mu\text{Ci})$$

(三) 比活性 单位体积或单位重量的放射性活度称比活性。比活性表示为 MBq/ml (mCi/ml)。

(四) 放射性纯度 样品中标明的放射性核素的活度占总样品中放射性活度的比值称为该