



# 放射性同位素手册

主编 孙树正

中国原子能出版传媒有限公司

## 图书在版编目 (CIP) 数据

放射性同位素手册 / 孙树正主编. —北京: 中国  
原子能出版传媒有限公司, 2011. 8  
ISBN 978-7-5022-5320-2

I. ①放… II. ①孙… III. ①放射性同位素-手册  
IV. ①O615-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 181093 号

## 内 容 简 介

本手册是放射性同位素领域的工具书, 是以现行有关放射性同位素的国家标准、管理法规和国际原子能机构的有关文件为基准, 并参照最新相关出版物和资料编写而成。主要内容包括: 放射性知识, 放射性同位素来源, 常用放射性核素表, 放射性测量和数据处理, 放射源及其应用, 放射性药物, 辐射技术应用, 放射性同位素示踪技术, 辐射安全和防护, 放射性物质运输国家管理法规及标准等。

本手册可供在放射性同位素及其相关领域中从事科研、生产、应用的广大科技人员和管理人员, 以及高等院校有关专业师生参考使用。

## 放射性同位素手册

---

出版发行 中国原子能出版传媒有限公司 (北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 孙凤春

技术编辑 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 三河市紫恒印装有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/32

印 张 9.875 字 数 284 千字

版 次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5320-2 定 价 48.00 元

---

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: [atomep123@126.com](mailto:atomep123@126.com)

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

# 《放射性同位素手册》

## 编审委员会

主 任：王国光

副主任：孙树正 武 健 勾学舜 杜 进  
韩全胜 刘金祥

秘 书：陈玉忠

委 员：(按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 王丁泉 | 尹玉吉 | 巴格那 | 朱清峰 |
| 刘云鹏 | 李国祥 | 李洪德 | 吴松年 |
| 陈家仪 | 陈殿华 | 茅 健 | 郭春生 |
| 常洪典 | 靳小宁 | 薛红松 |     |

# 前 言

从1958年中国利用反应堆辐照生产出第一批放射性同位素至今已经50余年,我国的放射性同位素制品已经形成规模化生产。目前放射性同位素产品已广泛应用在工业、农业、医学、环保、科研等领域,带动了这些领域的科技创新和对传统产业的改造,并创造了可观的经济效益。正如IAEA公报指出的“从对技术的广度而论,可能只有现代电子学和信息技术才能与同位素技术相比”。

随着放射性同位素与辐射技术的广泛应用,相关从业人员需要一本简明实用的放射性同位素手册,了解放射性知识、放射性同位素产品、放射性同位素与辐射技术实际应用,以及在应用过程中如何做到确保安全。

本手册是以现行的有关放射性同位素的国家标准、管理法规和国际原子能机构的有关文件为基准,并参照最新相关出版物和资料编写而成,保证了手册的科学性和实用性。

第1章至第4章主要是介绍放射性、放射性核素来源、常用的250余种放射性核素性质和放射性测量,使读者对放射性同位素有一个基本的了解。

第5章介绍各种放射源及其应用。放射源与配套设备组成的同位素仪器,广泛用在石油和地质勘探,物位、厚度、密度、路基湿度密度测量,焊口质量检查等方面,起到不可或缺的作用。最新开发的用 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线检查进出口车载货柜内容物系统,正在得到广泛应用。

第6章放射性药物。放射性药物在现代医学检查、诊断和治疗中起到重要作用。书中列出多种器官和组织检查用的放射免疫分析试剂盒,核医学诊断包括ECT、PET检查用放射性药物和多肽或受体配体放射性药物。为了规范用药,国标规定了核医学诊断的医疗照射指导水平。

第7章辐射应用。辐射应用技术正在高速发展,已经形成多个辐射应用产业:(1)医疗用品的辐射消毒灭菌已形成产业,利用辐照消毒的

比例越来越大；(2) 辐射突变育种扩大了生物变异谱，可在短期内获得长期天然变异难以产生的突变体，我国在这一领域居世界前列，为我国农业发展作出重要贡献；(3) 辐射有机高分子材料改性，已经生产出一批特种材料；(4) 辐照食品保鲜已经产业化；(5) 防治虫害，用大剂量杀死害虫，适当剂量照射达到生殖细胞损害，丧失延续后代能力。

第8章放射性同位素示踪技术。放射性示踪技术在工业生产过程控制，水利建设等领域已经得到实际应用。在生物和生命科学的研究中，放射性示踪技术的优势与效果特别引人注目。

第9章辐射安全和防护介绍辐射安全和防护常识，辐射防护措施。在放射性同位素技术的应用过程中，只要加强管理，防护措施得当，应该是安全的，辐射事故也是可以避免的。

第10章放射性物质运输介绍了国家对放射性物品运输制定的管理法规和国家标准。

为了便于读者查阅使用，我们编排了一个详细的目录。在编写时注意使用最简练的文字，选择最有用的资料，并采用了大量的图表，同时举例介绍了图表的使用方法，以方便读者使用。

中国同位素有限公司举全公司之力，成立了手册编审委员会，精心编写《放射性同位素手册》，并请国内有关专家罗志福、姚历农、夏益华、白光、范深根、桂立明、孙玉华等对全书或部分内容进行审阅，确保手册的质量，在此对为本手册付出辛勤劳动的专家表示衷心的感谢。

由于时间匆忙，本手册存在不足乃至错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

中国同位素有限公司《放射性同位素手册》编审委员会

# 目 录

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| 第1章 放射性 .....                   | ( 1 )  |
| 1.1 放射性核素和放射性同位素 .....          | ( 1 )  |
| 1.2 放射性核素衰变 .....               | ( 1 )  |
| 1.2.1 放射性核素衰变类型 .....           | ( 1 )  |
| 1.2.2 放射性核素衰变基本规律 .....         | ( 3 )  |
| 1.2.3 放射性核素衰变纲图 .....           | ( 6 )  |
| 1.2.4 放射性活度 .....               | ( 6 )  |
| 1.3 射线与物质的相互作用 .....            | ( 15 ) |
| 1.3.1 带电粒子与物质的相互作用 .....        | ( 15 ) |
| 1.3.2 不带电粒子与物质的相互作用 .....       | ( 18 ) |
| 附表 1-1 $\gamma$ 射线衰减系数 .....    | ( 21 ) |
| 第2章 放射性核素来源 .....               | ( 23 ) |
| 2.1 天然放射性核素 .....               | ( 23 ) |
| 2.2 核反应堆辐照生产放射性核素 .....         | ( 28 ) |
| 2.3 从裂变产物中提取放射性核素 .....         | ( 29 ) |
| 2.4 加速器生产放射性核素 .....            | ( 30 ) |
| 2.5 放射性核素发生器 .....              | ( 30 ) |
| 2.6 超铀元素的制备 .....               | ( 30 ) |
| 附表 2-1 反应堆生产放射性核素的产额 .....      | ( 31 ) |
| 附表 2-2 加速器生产放射性核素的产额 .....      | ( 37 ) |
| 附表 2-3 一些长寿命裂变产物核素的核性质和产额 ..... | ( 41 ) |
| 附表 2-4 常用放射性核素发生器的性能和用途 .....   | ( 42 ) |
| 附表 2-5 具有重要实用意义的超铀元素同位素 .....   | ( 44 ) |
| 第3章 常用放射性核素 .....               | ( 45 ) |
| 第4章 放射性测量和数据处理 .....            | ( 96 ) |
| 4.1 放射性测量 .....                 | ( 96 ) |

|              |                               |                |
|--------------|-------------------------------|----------------|
| 4.2          | 年代测定 .....                    | ( 98 )         |
| 4.3          | 测量数据处理 .....                  | ( 100 )        |
|              | 附表 4-1 主要放射性探测器及其应用 .....     | ( 103 )        |
| <b>第 5 章</b> | <b>放射源 .....</b>              | <b>( 106 )</b> |
| 5.1          | 放射源的质量控制 .....                | ( 108 )        |
| 5.1.1        | 质量控制标准 .....                  | ( 108 )        |
| 5.1.2        | 泄漏检验 .....                    | ( 111 )        |
| 5.2          | 各种放射源的性能和应用 .....             | ( 112 )        |
| 5.2.1        | $\alpha$ 放射源 .....            | ( 112 )        |
| 5.2.2        | $\beta$ 放射源 .....             | ( 113 )        |
| 5.2.3        | $\gamma$ 放射源 .....            | ( 115 )        |
| 5.2.4        | 同位素中子源 .....                  | ( 122 )        |
| 5.2.5        | 穆斯堡尔源 .....                   | ( 129 )        |
| 5.2.6        | 放射性核素能源 .....                 | ( 130 )        |
| 5.3          | 放射性参考物质 .....                 | ( 132 )        |
| 5.3.1        | 放射性标准溶液 .....                 | ( 132 )        |
| 5.3.2        | $\gamma$ 系列标准源 .....          | ( 133 )        |
| 5.3.3        | 参考源 .....                     | ( 134 )        |
| 5.4          | 各种放射性同位素仪表和所用放射源及探测器 .....    | ( 134 )        |
| 5.5          | 放射源分类 .....                   | ( 136 )        |
| 5.5.1        | 放射源分类办法 .....                 | ( 136 )        |
| 5.5.2        | 危险源和 $D$ 值 .....              | ( 136 )        |
| 5.6          | 同位素仪表的安全性能分级 .....            | ( 139 )        |
|              | 附表 5-1 密封源性能分级 .....          | ( 140 )        |
|              | 附表 5-2 放射源分类 .....            | ( 141 )        |
|              | 附表 5-3 用于一些常见实践的源的类别 .....    | ( 145 )        |
|              | 附表 5-4 同位素仪表的安全性能分级 .....     | ( 158 )        |
| <b>第 6 章</b> | <b>放射性药物 .....</b>            | <b>( 159 )</b> |
| 6.1          | 放射免疫分析试剂盒 .....               | ( 159 )        |
| 6.2          | $^{99m}\text{Tc}$ 放射性药物 ..... | ( 167 )        |

|                                        |                          |                |
|----------------------------------------|--------------------------|----------------|
| 6.3                                    | 其他诊断类放射性药物 .....         | ( 169 )        |
| 6.4                                    | 正电子断层显像放射性药物 .....       | ( 170 )        |
| 6.5                                    | 多肽或受体配体放射性药物 .....       | ( 171 )        |
| 6.6                                    | 治疗用放射性药物 .....           | ( 172 )        |
| 6.7                                    | 核医学诊断医疗指导水平 .....        | ( 174 )        |
| 6.8                                    | 放射源在医疗中的应用 .....         | ( 174 )        |
| 6.8.1                                  | 远距离 $\gamma$ 射线治疗 .....  | ( 174 )        |
| 6.8.2                                  | 近距离放射治疗 .....            | ( 174 )        |
| 附表 6-1 典型成年受检查者在各种诊断中的<br>活度指导水平 ..... |                          | ( 176 )        |
| 附表 6-2 放射性药品对成年人组织、器官产生的剂量 .....       |                          | ( 179 )        |
| <b>第 7 章</b>                           | <b>辐射应用 .....</b>        | <b>( 181 )</b> |
| 7.1                                    | 辐射应用范围 .....             | ( 181 )        |
| 7.2                                    | 辐射材料改性 .....             | ( 182 )        |
| 7.3                                    | 医疗用品灭菌消毒 .....           | ( 183 )        |
| 7.4                                    | 辐射育种 .....               | ( 183 )        |
| 7.5                                    | 食品保藏 .....               | ( 184 )        |
| 7.6                                    | 防治虫害 .....               | ( 186 )        |
| <b>第 8 章</b>                           | <b>放射性同位素示踪技术 .....</b>  | <b>( 187 )</b> |
| <b>第 9 章</b>                           | <b>辐射安全和防护 .....</b>     | <b>( 189 )</b> |
| 9.1                                    | 公众受到的辐射照射 .....          | ( 189 )        |
| 9.1.1                                  | 天然辐射源的辐射照射 .....         | ( 189 )        |
| 9.1.2                                  | 与核相关的人为活动引起的对公众的照射 ..... | ( 189 )        |
| 9.2                                    | 辐射生物效应 .....             | ( 190 )        |
| 9.3                                    | 常用放射性核素毒性分组 .....        | ( 191 )        |
| 9.4                                    | 辐射防护要求 .....             | ( 192 )        |
| 9.4.1                                  | 实践的正当性 .....             | ( 192 )        |
| 9.4.2                                  | 防护与安全的最优化 .....          | ( 192 )        |
| 9.4.3                                  | 剂量限值 .....               | ( 193 )        |
| 9.4.4                                  | 气持续照射情况下的行动水平 .....      | ( 194 )        |

|        |                                              |       |
|--------|----------------------------------------------|-------|
| 9.4.5  | 放射性残存物持续照射的剂量约束                              | (194) |
| 9.4.6  | 营运管理和技术要求                                    | (195) |
| 9.5    | 照射的控制                                        | (195) |
| 9.5.1  | 工作场所的区域划分                                    | (195) |
| 9.5.2  | 非密封放射源工作场所的分级                                | (195) |
| 9.5.3  | 工作场所的放射性表面污染控制水平                             | (196) |
| 9.6    | 应急照射情况的干预                                    | (197) |
| 9.7    | 辐射量和单位                                       | (198) |
| 9.8    | 辐射剂量监测                                       | (214) |
| 9.9    | 内照射防护                                        | (215) |
| 9.10   | 外照射防护                                        | (215) |
| 9.10.1 | 外照射防护方法                                      | (215) |
| 9.10.2 | $\gamma$ 辐射防护                                | (216) |
| 9.10.3 | 中子防护                                         | (225) |
| 9.10.4 | $\beta$ 辐射防护                                 | (228) |
| 9.11   | 放射性物质的管理                                     | (231) |
| 9.11.1 | 放射性物质的保管                                     | (231) |
| 9.11.2 | 豁免和解控                                        | (231) |
| 9.11.3 | 放射性废物的管理                                     | (233) |
| 9.12   | 放射性事故                                        | (234) |
| 附表 9-1 | 工作人员食入和吸入单位摄入量所致待积有效剂量 $e(g)$ 和 ALI 值及 DAC 值 | (236) |
| 附表 9-2 | 公众成员食入和吸入单位摄入量所致的待积有效剂量 $e(g)$               | (247) |
| 附表 9-3 | 不同能量光子在一些元素和物质中的质能吸收系数                       | (261) |
| 附表 9-4 | 工作场所辐射监测仪器的典型参数                              | (265) |
| 附表 9-5 | 各向同性点源 $\gamma$ 射线减弱 $K$ 倍所需水屏蔽厚度            | (267) |
| 附表 9-6 | 各向同性点源 $\gamma$ 射线减弱 $K$ 倍所需混凝土              |       |

|                                                      |         |
|------------------------------------------------------|---------|
| 屏蔽厚度 .....                                           | ( 269 ) |
| 附表 9-7 各向同性点源 $\gamma$ 射线减弱 $K$ 倍所需铁<br>屏蔽厚度 .....   | ( 271 ) |
| 附表 9-8 各向同性点源 $\gamma$ 射线减弱 $K$ 倍所需铅<br>屏蔽厚度 .....   | ( 273 ) |
| 附表 9-9 各向同性点源 $\gamma$ 射线减弱 $K$ 倍所需铅玻璃<br>屏蔽厚度 ..... | ( 275 ) |
| 附表 9-10 我国放射性废物分类 .....                              | ( 277 ) |
| <b>第 10 章 放射性物质运输</b> .....                          | ( 278 ) |
| 10.1 放射性物品分类 .....                                   | ( 278 ) |
| 10.2 免于运输监管的放射性物品 .....                              | ( 278 ) |
| 10.3 放射性物质运输容器的设计、制造和使用 .....                        | ( 279 ) |
| 10.4 常用放射性同位素产品货包分类 .....                            | ( 280 ) |
| 10.5 货包和外包装的分级 .....                                 | ( 282 ) |
| 附表 10-1 放射性物品分类和目录 .....                             | ( 283 ) |
| 附表 10-2 常用放射性核素的基本限值 .....                           | ( 290 ) |
| <b>参考文献</b> .....                                    | ( 297 ) |
| <b>附录</b> .....                                      | ( 299 ) |
| 与放射性有关的计量单位 .....                                    | ( 299 ) |
| 用于构成十进倍数和分数的 SI 词头 .....                             | ( 300 ) |
| 基本物理常量 .....                                         | ( 300 ) |
| 希腊字母表 .....                                          | ( 301 ) |
| 放射性核素衰变因子表 .....                                     | ( 302 ) |
| 元素周期表 .....                                          | ( 封三 )  |

# 第1章 放射性

## 1.1 放射性核素和放射性同位素

原子由原子核和外围电子组成，原子核由带电的质子和不带电的中子组成。不同质量数、质子数和核能态的原子核构成不同种类的原子。

具有特定质量数、质子数和核能态，而且平均寿命长得足以被观察到的一类原子称为核素。核素通常用符号 ${}^A_ZX$ 表示。 $X$ 是元素符号， $A$ 是质量数， $Z$ 是质子数即原子序数。

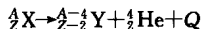
原子核内具有相同质子数但中子数不同的核素，它们在元素周期表中处于同一位置，称为同位素。某些核素是不稳定的，自发地衰变成一种新核素，同时放出一种或多种射线，这种特性称为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素或放射性同位素。表征放射性核素特征的主要是其衰变时所发射射线的种类、能量和强度以及衰变半衰期。

## 1.2 放射性核素衰变

### 1.2.1 放射性核素衰变类型

放射性核素衰变生成的新核素可能是稳定的，也可能是放射性的，继续衰变直到变成稳定核素。一种放射性核素还可能有两种或多种不同的衰变类型，并按一定比例进行衰变。核衰变的类型较多，主要是 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变、 $\gamma$ 衰变和自发裂变。

(1)  $\alpha$ 衰变。 $\alpha$ 衰变的表示式为：



式中， ${}^A_ZX$ 代表衰变前的母体核素； ${}^{A-4}_{Z-2}Y$ 代表衰变后生成的子体核素； $Q$ 表示衰变能。 $\alpha$ 衰变发射的 $\alpha$ 粒子（实际是 ${}^4_2\text{He}$ ）有一定的动能。

(2)  $\beta$ 衰变。 $\beta$ 衰变有三种类型，即 $\beta^-$ 、 $\beta^+$ 和轨道电子俘获。

(a)  $\beta^-$ 衰变是由于原子核内中子相对过多，导致核内一个中子转变为质子，同时释放出一个电子（ $e^-$ ）。 $\beta^-$ 衰变的表示式为：

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu} + Q$$

式中,  $\bar{\nu}$  是反中微子, 它和中微子 ( $\nu$ ) 均不带电荷, 其静止质量几乎为零的稳定的中性粒子, 始终以光速运动, 但是两者自旋方向不同。 $\beta^-$  衰变所发射的  $\beta^-$  射线的能量从 0 到  $E_{\max}$  连续分布, 通常以平均能量或最高能量表示。

(b) 原子核内中子相对缺少时, 一个质子转变为一个中子, 同时从核内释放出正电子 ( $e^+$ ), 这个过程称为  $\beta^+$  衰变。正电子的质量和负电子的质量相等, 但带一个正电荷。 $\beta^+$  衰变的表示式为:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + e^+ + \nu + Q$$

$\beta^+$  射线能谱与  $\beta^-$  射线相似, 能量从 0 到  $E_{\max}$  连续分布。 $\beta^+$  粒子全部动能失去后, 便和周围物质中的自由电子结合, 转变为两个方向相反, 而能量均为 0.511 MeV 的光子, 电子本身质量消失, 这一现象称为正电子湮没, 形成的  $\gamma$  辐射称为湮没辐射。

(c) 轨道电子俘获是原子核从核外俘获一个轨道电子, 使核内一个质子转变为一个中子, 简称 EC。可以表示为:

$${}^A_ZX + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu + Q$$

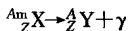
如果母核发生了 K 俘获, 则 K 壳层少了一个电子, 出现一个空位, 这时处于较高能态的电子就会跃迁到 K 壳层, 填补这个空位, 多余的能量则以特征 X 射线形式放出。

K 俘获产生的子核, 除了通过放出特征 X 射线将多余的能量释放外, 还可能将此能量转移给某一个轨道电子, 使这个电子获得足够的能量脱离原子核的束缚而成为自由电子, 这一电子称为俄歇电子。

(3)  $\gamma$  辐射和同质异能跃迁。在核素衰变时产生的子核, 可能暂时处于激发核能级, 之后很快过渡到较低能量的激发态或基态, 在这个过程中, 多余的能量就以  $\gamma$  射线的形式辐射出来。由于原子核可能有若干个可采用的量子态, 因此原子核退激时可以辐射一个光子, 两个或更多个级联辐射的光子。由于激发态存在时间都极短 (约  $10^{-13}$  s), 可以将  $\gamma$  辐射看成是与形成激发态核的母体衰变同时发生的。 $\gamma$  射线是静止质量为 0, 波长短, 不带有电荷, 能量较高的电磁辐射。放出  $\gamma$  射线的原子核其质量数、电荷数均保持不变, 只是能量状态发生了变化,

故又称这种过程为同质异能跃迁。

同质异能素跃迁过程是指处于激发态的子体核素存在时间比较长，通过发射  $\gamma$  射线转化为基态，同质异能素的表示方法是在原子质量数后加  $m$ ，其跃迁过程表示式为：



有时原子核  $\gamma$  跃迁不发射  $\gamma$  光子，而是把多余能量交给核外绕行的电子（主要是 K 层电子），使它脱离原子核束缚而发射出来，这种现象称为内转换，发射出电子的能量是固定的，近似于  $\gamma$  光子的能量。

(4) 自发裂变。某些重核具有自发裂变的特性，即原子核在无外力的作用下自发裂变成轻核素，称作“裂片”，并发射中子和高能量辐射。

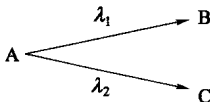
### 1.2.2 放射性核素衰变基本规律

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = A, N = N_0 e^{-\lambda t}, A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T}$$

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}, \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = T/0.693 \approx 1.443T$$

式中， $N$  和  $N_0$  分别是时刻  $t$  时和最初时放射性核素的原子数； $A$  和  $A_0$  分别是时刻  $t$  时和最初时放射性核素的活度； $\lambda$  为衰变常数，表示一个放射性核素在单位时间内衰变掉的概率； $T$  为半衰期，表示特定能态的放射性核素的原子核数目衰变到原来一半所需要时间的期望值； $\tau$  为平均寿命，表示某种放射性核素的平均存在时间。

(1) 分支衰变。如果放射性核素 A 同时按两种方式衰变为 B 和 C



A 的总衰变常数  $\lambda$  等于各分支的衰变常数的和： $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ ， $\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}$ 。各分支 B 和 C 的放射性活度为： $A_1 = \lambda_1 N = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda t}$ ， $A_2 = \lambda_2 N = \lambda_2 N_0 e^{-\lambda t}$ 。总放射性活度为： $A = \lambda_1 N + \lambda_2 N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$ 。有些核

素可能发生多个分支衰变。

(2) 连续衰变。在放射性核素衰变过程中，经常遇到一个核素经过两次或多次衰变后方可达到稳定的核素，这种过程称作连续衰变。以两次连续衰变为例：

$$1 \xrightarrow{\lambda_1} 2 \xrightarrow{\lambda_2} 3 \text{ (稳定)}$$

$$-\frac{dN_1}{dt} = \lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$N_1 = N_{1,0} e^{-\lambda_1 t}, \quad A_1 = A_{1,0} e^{-\lambda_1 t}$$

如  $t=0$  时,  $N_{2,0}=0$

$$\text{则 } N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1,0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}), \quad A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{1,0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

如  $t=0$  时,  $N_{2,0} \neq 0$

$$\text{则 } N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1,0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{2,0} e^{-\lambda_2 t},$$

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{1,0} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_{2,0} e^{-\lambda_2 t}$$

式中,  $N_1$  和  $N_2$  为  $t$  时刻放射性核素 1, 2 的原子数;  $N_{1,0}$  和  $N_{2,0}$  为  $t=0$  时刻放射性核素 1, 2 的原子数;  $A_1$  和  $A_2$  为  $t$  时刻放射性核素 1, 2 的活度;  $A_{1,0}$  和  $A_{2,0}$  为  $t=0$  时放射性核素 1, 2 的活度;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为放射性核素 1, 2 的衰变常数。

(3) 放射性平衡。在连续衰变过程中，因为母体核素与子体核素的半衰期不同，可能出现三种情况：

(a) 暂时平衡 ( $T_1 > T_2$ , 且  $t$  足够大时, 如图 1-1 所示)

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1,0} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1 \left( \frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \text{常数} \right)$$

$$A_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{1,0} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1, \quad \frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

$^{99}\text{Mo}$ - $^{99\text{m}}\text{Tc}$  是暂时平衡体系的典型。

(b) 长期平衡 ( $T_1 \gg T_2$ , 即  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ , 且  $t$  足够大时, 如图 1-2 所示)

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_{1,0} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1, \quad \lambda_2 N_2 \approx \lambda_1 N_1, \quad \text{即 } A_2 \approx A_1$$

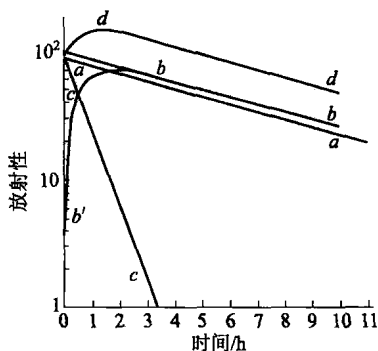


图 1-1 暂时平衡母子体衰变生长体系

曲线  $aa$ : 母体的放射性活度; 曲线  $bb$ : 母子体混合物中子体的放射性活度

( $t$  足够长后); 曲线  $b'b'$ : 新纯化过的母体内子体放射性活度的增长;

曲线  $cc$ : 新分离出的子体的衰变; 曲线  $dd$ : 母、子体系总放射性活度 (最初只有纯母体)。

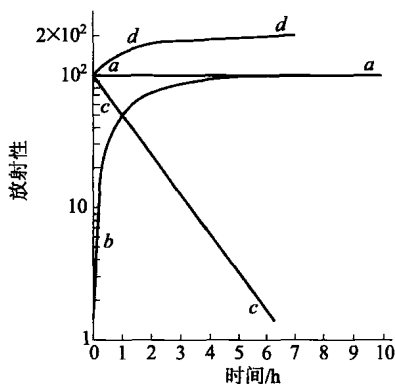


图 1-2 长期平衡母体 ( $T_1$  很长) 和子体 ( $T_2=1.0$  h) 的放射性衰变图

曲线  $aa$ : 母体的放射性活度; 曲线  $cc$ : 新分离出的子体的衰变;

曲线  $ba$ : 新纯化过的母体内子体放射性活度的增长;

曲线  $dd$ : 母、子体系总放射性活度 (最初只有纯母体)。

当  $t$  足够大时, 此时, 母、子体核素的放射性活度几乎相等, 这种平衡称为长期平衡。 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  发生器属于此类型。

上述各式中,  $T_1$  和  $T_2$  为放射性核素 1 (母体) 和 2 (子体) 的半衰期;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为放射性核素 1 (母体) 和 2 (子体) 核素的衰变常数;  $N_1$  和  $N_2$  为处于放射性平衡时, 放射性核素 1 (母体) 和 2 (子体) 核素的原子数。

(c) 若母体核素半衰期小于子体半衰期, 经过一定时间后, 总的放射性衰变将按子体的半衰期衰变。

### 1.2.3 放射性核素衰变纲图

一些放射性核素的衰变纲图如图 1-3 (a) 至图 1-3 (h) 所示。

### 1.2.4 放射性活度

在给定时刻处于一给定能态的一定量的某种放射性核素的活度  $A$  定义为:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

式中,  $dN$  是在时间间隔  $dt$  内该核素从该能态发生自发核跃迁数目的期望值。

放射性活度 SI 单位是秒的倒数 ( $\text{s}^{-1}$ ), 称为贝可 [勒尔] ( $\text{Bq}$ )。每秒钟发生一次衰变为 1 贝可 ( $1 \text{ Bq} = 1/\text{s}$ )。曾用单位是居里 ( $\text{Ci}$ ),  $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ 。

活度浓度、质量活度或比活度都是指每单位质量的固体物质中放射性活度 ( $\text{Bq/g}$ ), 或每单位体积的液体或气体中所含的放射性活度 ( $\text{Bq/ml}$ ) (见表 3-1)。

1 Bq 放射性核素的质量和活度浓度为:

$$m = 8.62 \times 10^{-21} MT$$

$$S = 1.16 \times 10^{20} M^{-1} T^{-1}$$

式中,  $m$  为放射性核素 1 Bq 的质量 ( $\text{g}$ );  $T$  为半衰期 ( $\text{h}$ );  $M$  为放射性核素摩尔质量 (质量数);  $S$  为无载体放射性核素的活度浓度 ( $\text{Bq/g}$ )。