

核环境保护与污染控制技术丛书



湖南省重点学科专项基金资助项目

# 放射性废水 处理技术

● 周书葵 娄涛 庞朝晖 等编著



化学工业出版社

-3

核环境保护与污染控制技术丛书

TL941  
Z793



湖南省重点学科专项基金资助项目



郑州大学 \*04010779241Z\*

# 放射性废水 处理技术

● 周书葵 娄涛 庞朝晖 等编著



TL941

Z793



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以铀矿开采、铀水冶及核燃料应用（如核电站、乏燃料后处理、放射性同位素应用等）过程为主线，系统介绍了放射性废水来源、水质特征，论述了放射性废水处理方法和综合利用、放射性污泥和浓缩液的处理处置等方法。本书注重吸取现有放射性废水处理研究的新成果、新技术，并结合工程实例加以论述。

本书针对性强，注重放射性废水处理的系统性、理论性及实用性，可供环境工程、市政工程、核能等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考，也可供高等学校相关专业师生参阅。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

放射性废水处理技术/周书葵，娄涛，庞朝晖等编著. —北京：  
化学工业出版社，2011.10  
（核环境保护与污染控制技术丛书）  
ISBN 978-7-122-12291-9

I. 放… II. ①周…②娄…③庞… III. 放射性废水-放射性废物处理 IV. TL941

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 184795 号

---

责任编辑：刘兴春  
责任校对：徐贞珍

文字编辑：刘砚哲  
装帧设计：刘丽华

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 300 千字 2012 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：58.00 元

版权所有 违者必究

# 《核环境保护与污染控制技术丛书》编委会

主 任：谢水波

副主任：彭小勇

委 员：（以姓氏笔画为序）

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 王文涛 | 王宏青 | 王劲松 | 王清良 | 刘迎九 |
| 刘金香 | 李仕友 | 杨金辉 | 张晓文 | 张晓健 |
| 周书葵 | 荣丽杉 | 娄金生 | 唐东山 | 彭小勇 |
| 谢 磊 | 谢水波 |     |     |     |

近年来世界各国核工业的迅速发展和放射性同位素在国民经济各部门、科学研究各领域中的广泛应用,给人们提出了一个迫切需要解决的问题,即如何有效地处理由此而产生的大量的放射性废水,也可以说,这一问题处理的好坏直接关系到核工业的可持续发展问题。放射性废水进入环境后造成水和土壤污染并可能通过多种途径进入人体,对环境和人类造成危害。

在核工业中,热铀处理过程中产生的包含主要裂变产物的废液,具有强烈的放射性,目前在处理这类废液方面,唯一的方法是在控制条件下把废液(或固化)藏于与外界隔离的地方。然而除此之外,在铀选冶和放射性应用过程中,产生数量大的还是中放射性废水(中放废水)、低放射性废水(低放废水),随着核电站和后处理的陆续投入使用,放射性废水不断产生,放射性废水的处理技术也随之由简单的暂存、稀释排放向“零排放”目标迈进。

当前几个核大国中,美国经历了由直接向环境排放发展到深度净化的过程。1944年开始,美国汉福特核材料生产基地投入运行,由此产生了大量的低放废液,美国为此修建了很多地上的蓄水池和地下渗沟来排放这些低放废水,通过天然蒸发和地下渗流处理低放废水,有些蓄水池和地下渗沟距离哥伦比亚河仅100m,造成了地下水和环境的污染。这种早期的低放废水处理方式的危害性较大。1987年,美国国会当年发布法令,要求1995年前停止这种低放废液处理方法。随后美国开发了低放废水处理技术,相继发展了无机离子吸附-超滤技术、压缩蒸发-反渗透处理技术和旋转超滤技术。俄罗斯也经历了由直接海洋排放向“零排放”的发展过程。前苏联早期向北冰洋直接排放放射性废水,直接处置放射性固体废物容器、放射性废液容器和反应堆芯,直到1993年,这种放射性废物处置方式才被停止。俄罗斯新型后处理厂产生的低放废水采用“零排放”工艺,低放废水首先被暂存在废液罐内,之后,废液经过沉淀、过滤、离子交换得到深度净化,净化后的水重复利用。英国从一开始就比较重视低放废水中长寿命核素的深度去除,开发了SETP工艺、SIXEP工艺、EARP工艺和TPP沉淀工艺,从而使废液得到净化。SETP主要是处理酸性和碱性低放废水,通过中和原理,将废水变为中性,其中的放射性元素通过超滤得到分离、去除。SIXEP于1985年投入运行。低放废水经过SIXEP后,其中绝大部分的 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{90}\text{Sr}$ 被去除。EARP主要用来去除废水中的锕系元素。TPP沉淀法主要针对的是钍,将其从废水中分离出去。我国早期低放废水主要采用沉淀和天然蒸发池等两种工艺。目前我国低放废水处理新技术不断发展,共沉淀-超滤-选择性吸附工艺、热泵蒸发工艺和膜法处理工艺正处于研发和应用阶段。

本书共分7章,以铀矿开采、铀水冶及其应用(如核电站、乏燃料后处理、放射性同位

素应用等)工艺过程为主线,在介绍核工业中典型生产工艺流程的基础上,系统地阐述了各生产过程中放射性废水产生、废水水质特征;详细论述了各种核放射性废水的传统处理方法、生物处理及膜处理方法、放射性废水的综合利用、放射性污泥和浓缩液的处理与处置等方面的技术细节及研究前沿,注重吸取当今世界有关放射性核废水处理研究的新成果,并结合工程实例加以论述。全书具有体系结构完善、理论与实际相结合、针对性强等特点,注重核工业放射性废水处理知识的系统性、完整性、理论性及实用性相结合的原则,具有相当的实用性。

本书由周书葵、娄涛、庞朝晖、刘迎九等编著而成。在编著过程中还得到了南华大学谢水波教授、娄金生教授的审阅和指导;在编著和出版中得到了南华大学教务处、国家自然科学基金(51174117、11175081)、湖南省科技厅重点项目(2011SK 2015)、湖南省重点学科——市政工程学科的大力支持与资助;化学工业出版社在本书的编辑、出版中付出了辛勤的劳动;在本书编著中,参考了本书末所列出作者的有关文献,从中得到了许多启发,在此一并表示衷心的感谢。

本书可供环境工程、市政工程、核能等领域的工程技术人员、科研人员和管理人员参考,也可供高等学校相关专业师生参阅。

限于编著者水平,加上由于涉及的学科(专业)较多,有些问题还有待于进一步推敲,故书中不足和疏漏之处难以避免,恳请读者批评指正。

编著者

2011年9月

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 绪论</b>          | <b>1</b>  |
| 1.1 物质的放射性               | 1         |
| 1.1.1 放射性的衰变规律           | 2         |
| 1.1.2 核素的衰变常数、半衰期与平均寿命   | 3         |
| 1.1.3 放射性的活度与比活度         | 4         |
| 1.2 放射性的应用               | 4         |
| 1.3 放射性的危害及其防护           | 7         |
| 1.3.1 放射性的危害             | 7         |
| 1.3.2 放射性危害的防护           | 7         |
| <b>第 2 章 放射性废水的来源和分类</b> | <b>13</b> |
| 2.1 概述                   | 13        |
| 2.2 放射性废水分类              | 14        |
| 2.3 铀选冶厂生产工艺及其放射性废水      | 15        |
| 2.3.1 概述                 | 15        |
| 2.3.2 酸法水冶和碱法水冶          | 15        |
| 2.3.3 堆浸和地浸              | 16        |
| 2.3.4 铀金属生产              | 18        |
| 2.4 核电站及其放射性废水           | 19        |
| 2.4.1 核反应堆的主要类型          | 19        |
| 2.4.2 核反应堆的结构            | 21        |
| 2.4.3 核电站放射性废水           | 22        |
| 2.5 乏燃料后处理过程及其放射性废水      | 25        |
| 2.5.1 脱壳废水               | 26        |
| 2.5.2 后处理废水              | 27        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 2.6 放射性同位素应用及其放射性废水         | 28         |
| 2.6.1 医用废水                  | 28         |
| 2.6.2 工业用废水                 | 28         |
| 2.6.3 实验室废水                 | 29         |
| <b>第3章 传统放射性废水的处理方法</b>     | <b>31</b>  |
| 3.1 铀选冶废水处理方法               | 31         |
| 3.1.1 堆浸和地浸废水处理             | 31         |
| 3.1.2 铀选冶厂废水处理              | 34         |
| 3.1.3 铀尾矿废水处理               | 36         |
| 3.2 反应堆与乏燃料后处理的废水处理方法       | 37         |
| 3.2.1 混凝沉淀-过滤处理             | 37         |
| 3.2.2 蒸发处理                  | 42         |
| 3.2.3 离子交换处理                | 52         |
| <b>第4章 放射性废水的生物处理和膜处理方法</b> | <b>65</b>  |
| 4.1 生物处理法                   | 65         |
| 4.1.1 概述                    | 65         |
| 4.1.2 微生物与放射性核素的作用方式        | 66         |
| 4.1.3 铀等放射性物质的生物吸附          | 67         |
| 4.1.4 影响生物处理的因素             | 70         |
| 4.1.5 生物处理法在放射性废水处理中的应用     | 71         |
| 4.2 膜分离处理法                  | 74         |
| 4.2.1 概述                    | 74         |
| 4.2.2 膜的分类与分离原理             | 75         |
| 4.2.3 制备方法及系统设计             | 87         |
| 4.2.4 膜法水处理的预处理工艺           | 91         |
| 4.2.5 膜分离技术在放射性废水处理中的应用     | 95         |
| <b>第5章 放射性废水的综合利用</b>       | <b>104</b> |
| 5.1 放射性废水中回收铀和镭             | 104        |
| 5.1.1 铀的回收                  | 104        |
| 5.1.2 镭的回收                  | 105        |
| 5.2 核燃料后处理高放废液中提取裂变同位素和超铀元素 | 106        |
| 5.2.1 裂变同位素的提取              | 106        |
| 5.2.2 超铀元素的提取               | 113        |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 5.3        | 放射性废水中回收酸碱等化学试剂 .....        | 115        |
| 5.3.1      | 后处理厂硝酸和异己酮的回收 .....          | 116        |
| 5.3.2      | 铀水冶厂回收氨水和硝酸 .....            | 117        |
| 5.4        | 放射性废水的重复利用 .....             | 117        |
| 5.4.1      | 工艺废水直接返回利用 .....             | 117        |
| 5.4.2      | 中水系统 .....                   | 120        |
| <b>第6章</b> | <b>放射性污泥与浓缩液的处理与处置 .....</b> | <b>121</b> |
| 6.1        | 浓缩液的固化处理 .....               | 121        |
| 6.1.1      | 概述 .....                     | 121        |
| 6.1.2      | 水泥固化处理 .....                 | 123        |
| 6.1.3      | 沥青固化处理 .....                 | 128        |
| 6.1.4      | 塑料固化处理 .....                 | 134        |
| 6.2        | 高放废液固化处理 .....               | 136        |
| 6.2.1      | 煅烧法处理 .....                  | 136        |
| 6.2.2      | 玻璃固化 .....                   | 138        |
| 6.2.3      | 陶瓷固化 .....                   | 140        |
| 6.2.4      | 人造岩石固化 .....                 | 140        |
| 6.3        | 高放废液的最终处置 .....              | 142        |
| 6.3.1      | 槽式储存 .....                   | 143        |
| 6.3.2      | 分离-嬗变 .....                  | 143        |
| 6.3.3      | 最终处置 .....                   | 147        |
| <b>第7章</b> | <b>放射性废水处理工程实践 .....</b>     | <b>149</b> |
| 7.1        | 中放废水处理工程 .....               | 149        |
| 7.1.1      | 工程概况 .....                   | 149        |
| 7.1.2      | 废水处理工艺流程及特点 .....            | 149        |
| 7.1.3      | 工艺运行与管理 .....                | 154        |
| 7.2        | 弱放废水处理工程 .....               | 155        |
| 7.2.1      | 工程概况 .....                   | 155        |
| 7.2.2      | 废水处理工艺及特点 .....              | 155        |
| 7.2.3      | 工艺改进 .....                   | 157        |
| 7.2.4      | 工艺运行及管理 .....                | 158        |
| 7.3        | 某核电站的放射性废水处理工程 .....         | 159        |
| 7.3.1      | 工程概况 .....                   | 159        |
| 7.3.2      | 废水处理工艺流程及特点 .....            | 160        |

**附录 ..... 165**

    附录 I   轻水堆核电厂放射性废液处理系统技术规定..... 165

    附录 II   核电厂放射性液态流出物排放技术要求..... 178

    附录 III   放射性废物的分类..... 181

    附录 IV   操作非密封源的辐射防护规定..... 184

  

**参考文献 ..... 191**

## 第1章

# 绪论

## 1.1 物质的放射性

德国物理学教授伦琴利用阴极射线管进行科学研究，于1895年12月28日发现了X射线。当时伦琴正对阴极射线进行仔细观察研究，突然发现放在1m外涂有亚铂氰化钡（一种荧光物质）的纸上也能发出一种青绿色的荧光。如果去掉阴极射线管上的高电压，阴极射线管停止工作，而亚铂氰化钡纸上的荧光也就同时消失。若再加上高电压使阴极射线管重新工作，纸上的荧光就又重现。奇怪的是当把纸慢慢移远时，竟然仍能见到闪烁的萤火。于是判断，纸上的荧光一定是由阴极射线管工作时所产生的。但当时已知的阴极射线只能穿过几厘米厚的空气层，故认定还有一种人们肉眼所不能见到的射线穿过阴极射线管的管壁，打在纸上，结果产生了荧光。

伦琴为了对这种神秘的射线能有更进一步了解，又继续做了许多试验。例如，他用黑纸把整个阴极射线管严密地包封起来。又在阴极射线管和涂有荧光物质的纸间放置上千页厚的书，或几厘米厚的木板，或几毫米厚的铝板等。试验结果发现，无论是纸、木板、玻璃，甚至金属都不能挡住这种射线。这就说明所产生的射线确有很强的穿透能力。由于当时伦琴对这种射线的性质还不分清楚，故人们就把它叫做“X射线”。后人为了纪念伦琴的功勋，也称之为“伦琴射线”。

伦琴的伟大发现是在1895年圣诞节后公诸于世的。当时立即引起了许多物理学家的注意。特别是医生们在看到第一张显示人体手骨骼的照片后就更为激动。从此，他们可利用X射线拍片，察看病人的骨骼在何处破裂或直接寻找弹片和子弹在人体中的位置，以便及时治疗。在第一次世界大战期间，居里夫人就曾在法国部队中，组织伤兵医疗服务队，在战地前

线建立了第一座有 X 射线设备的医疗站，抢救和医治了很多伤病员。从此 X 射线在医学上不论是诊断或治疗都得到了非常广泛的应用。

X 射线的发现大大地推动了近代物理学的发展。就在伦琴发现 X 射线的第二年，法国人贝克勒尔从铀盐中也发现了放射性。又过了一年，英国人汤姆逊发现了电子等。由于这些重大发现，就使得人们对物质结构的认识更加深化了，人们的思维已深入到原子内部，开始探索原子世界的奥秘了。

玛丽·居里出生于波兰后来加入法国籍，是历史上第一位两次获得诺贝尔科学奖的著名物理学家，她的研究工作是先从铀盐开始的，她指出：“铀所发出的射线强度正比于所用铀的数量，而同铀与其他元素结合的状态无关。这种射线也不受外界条件如光、温度和压力等变化的影响。而且这种射线与人们已知的其他任何东西都不同，也没有东西能影响它们的存在”。后来，居里夫人就把这种能够发射射线的现象称为“放射性”，而把能发射射线的元素叫做“放射性元素”。接着又认识到了钍、钋和镭等也有这种放射性的特性，最后通过磁场终于知道这种射线由三种成分所组成的，分别叫做  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  射线。

### 1.1.1 放射性的衰变规律

原子核是由质子和中子组成，在核的周围有电子沿着闭合的轨道旋转。由于原子是中性的，原子核中的质子数等于外围的电子数，这个数值称为元素的原子序数。原子序数相同而质量数不同的元素，它们的化学性质相同，但核的习性却往往大不相同，这样的元素称为同位素。有的同位素是稳定的，它的核不会自发地发生改变，称为稳定同位素。有的同位素不稳定，其原子核即使不受外界因素的作用，也会自发地发生变化，称为放射性同位素。如氢 ( ${}^1_1\text{H}$ )，氘 ( ${}^2_1\text{H}$ ) 和氚 ( ${}^3_1\text{H}$ ) 三种同位素中，氢和氘是稳定的，而氚是放射性同位素，它会放射出  $\beta$  粒子而蜕变成氦 ( ${}^3_2\text{He}$ )。这种原子核自发地发生分解，并放出辐射线的性质叫作放射性。

现已查明，原子序数比 83 大的元素几乎完全是由放射性同位素所组成，称为天然放射性元素。原子序数小于 83 的某些元素，经过人为地用放射性元素照射或用带电粒子、中子等轰击后，也能引起放射性，这种元素称为人工放射性同位素。但也有例外，如钾的同位素  ${}^{40}_{19}\text{K}$ （在天然钾中占 0.012%），是天然放射性同位素。

放射性元素放出的  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  三种射线，其中  $\alpha$  射线是氦原子核流，带正电； $\beta$  射线是电子流，带负电； $\gamma$  射线是波长极短的电磁波。

在一般情况下，元素的放射性不受它所处的物理和化学状态的影响，其衰变过程完全是原子核内部一种自发的反应。原子核的衰变既不受外界条件的控制，各原子核之间也无任何联系，因此对某一原子核来说，其衰变完全是偶然事件。只能用统计规律来研究一群原子核的衰变情况。

假如放射性元素在一瞬间内衰变的数量为  $dN$ ，显然， $dN$  与衰变的时间  $dt$  成正比，时间越长，衰变的数量越大； $dN$  与放射性元素在该瞬时存在的原子核数量  $N$  成正比，放射性元素原有数量越多，则衰变的数量也越多。这一统计规律可用下式表示：

$$-dN = \lambda N dt \quad (1.1)$$

式中  $\lambda$ ——衰变常数，表示单位时间内每一个原子核发生衰变的概率，各种放射性同位素都有它固定的衰变常数；

——表示随着时间的增加, 原子数  $N$  在减小, 而衰变的原子数  $dN$  在增加。

对上式积分, 即可求得经过  $t$  时间衰变后剩余的放射性元素量为:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

式中  $N_0$  ——  $t=0$  时放射性元素的原有量。

## 1.1.2 核素的衰变常数、半衰期与平均寿命

### (1) 衰变常数 (decay constant)

衰变常数是放射性核衰变快慢的标志, 用  $\lambda$  表示。由公式 (1.1) 可得:

$$\lambda = \left( -\frac{dN}{dt} \right) / N \quad (1.3)$$

它表示单位时间内的衰变概率, 即衰变速率。对于同数目  $N$  的两种放射性核素的样品中, 衰变常数  $\lambda$  大的, 单位时间内的衰变概率大, 核衰变速率也大, 该样品的放射性强。 $\lambda$  是每个放射性核素特有的常数, 因此测定衰变常数  $\lambda$  是识别放射性核素的一个重要方法。

通常核衰变是遵从统计规律的, 放射性衰变常数是表征放射性核素性质的特征恒量, 不受外界物理因素或化学因素的影响。

### (2) 半衰期 (half-life)

放射性核素衰变到原有核素一半所需的时间称为半衰期, 其表达式为:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.4)$$

通常对大量原子核的统计规律, 其计算式为:

$$N_t = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}} \quad (1.5)$$

式中  $N$  —— 核的个数, 此式也可以演变成  $m_t = m_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$  或  $n_t = n_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T}}$ ;

$m$  —— 放射性物质的质量;

$n$  —— 单位时间内放出的射线粒子数;

半衰期是放射性元素的一个特征常数, 它一般不随外界条件 (温度、压强) 的变化, 元素所处状态 (游离态或化合态) 的不同和起始元素质量的多少而改变。因为任何放射性核素的衰变都属一级反应, 所以每一种放射性核素都有恒定的半衰期。各种放射性核素的半衰期相差很悬殊, 例如,  $^{212}\text{Po}$  钋的半衰期是 0.3 微秒, 而  $^{144}\text{Nd}$  钕的半衰期却达  $2.1 \times 10^{15}$  年, 相差 1029 倍。理论上放射性核素的原子数只有经历无限长的时间后才变为零。实际上经历 7 个半衰期, 原子数就降为原来的  $(1/2)^7 = 1/128$ , 一般可以忽略。

### (3) 平均寿命 (mean lifetime)

平均寿命指的是放射性核素的平均存活时间, 其表达式为:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.6)$$

在  $t \rightarrow t+dt$  内, 发生衰变的核数目为  $-dN = \lambda N dt$ , 这些核的寿命为  $t$ , 则所有核素的总寿命为  $\int_0^\infty \lambda N t dt$ , 于是任一核素的平均寿命为:

$$\tau = \frac{\int_0^\infty \lambda N t dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = 1.44 T \quad (1.7)$$

可见  $\tau$  比半衰期长一点。将上式代入衰变规律还可得到： $N=N_0e^{-\lambda t}\approx 37\%N_0$ ，表示经过时间  $\tau$  后，余下的核素数目约为原来的 37%。

### 1.1.3 放射性的活度与比活度

#### (1) 放射性的活度 (radio activity)

放射性活度代表放射性物质在单位时间内发生衰变的原子核数，用  $A$  表示。同时  $A$  又称“放射性强度”，或者“放射率”、“衰变率”，但是  $A$  只描述放射源每秒发生核衰变的次数，并不表示放射出的粒子数。其表达式为：

$$A=-\frac{dN}{dt}=\lambda N=\lambda N_0e^{-\lambda t}=A_0e^{-\lambda t} \quad (1.8)$$

在国际单位制中，放射性的单位为贝可勒尔，简称贝可，符号 Bq。1Bq 等于放射性物质在 1 秒钟内有 1 个原子核发生衰变。其表达式如下：1Bq=1 次衰变/秒

早期的放射性单位叫居里 (Ci)。它早期的定义是：1 克  $^{226}\text{Ra}$  所具有的放射性活度。后来规定，居里与贝可的关系如下：1Ci= $3.7\times 10^{10}$  Bq

早期除了有规定的居里单位，还用毫居 (mCi)、微居 ( $\mu\text{Ci}$ ) 来作单位，现在已经废除，但在早期的文献中经常可以看到。

#### (2) 放射性的比活度 (radio specific activity)

在实际工作中往往采用比活度来表示放射性的强度。放射性比活度是指放射性物质的放射性活度与其质量之比，即单位质量（通常用重量表示）产品中所含某种核素的放射性活度。其单位是贝可/克 (Bq/g)。在放射性废水测量中，比活度常用单位体积溶液中的活度表示，单位为贝可/毫升 (Bq/mL)。

## 1.2 放射性的应用

放射性的应用实质是指具有放射性核素的原子核核能的利用。和平利用原子能（核能），乃是当代科学技术发展的必然趋势，目前，核能已广泛地用在各国经济当中，核工业已经得到了迅速发展，并将会得到加速发展。

人类一直为寻取和扩大能源，为解决世界性的能源危机，为提高驾驭自然界的能力而斗争。从 19 世纪末开始，原子核的秘密逐渐被揭开，从 20 世纪 30 年代来，铀核裂变现象的发现，历时近 80 年，特别是核电能源问题的出现，为核的发展扩大了前景。核工业发展迅速，核能很快地在各个方面得到了实际应用，导致了数以千计的核电站和各种核动力船舰及各种反应堆的建造。

放射性应用的形式可分成三种：第一，它可以作为新的科学研究工具（即示踪原子）应用于各种学科。其中包括物理学、化学、生物学、医学、地质学和考古学等；第二，放射性同位素所发射的射线和 X 射线很相似，可以用来作为辐射源去透视各种 X 射线不能透视的材料内部的特性和缺陷，并可以在大规模生产中，用作自动检查仪器及各种测量仪器等等；第三，它可作为核能源应用，如核电池。下面仅就某些方面的应用加以简单介绍。

### (1) 在时间测量方面的应用

在考古学中,我们可以利用测定发掘物中 $^{14}\text{C}$ 放射性核素的含量,来确定它的年代。这是由于不论植物的品种和生长在何处,其新细胞组织中每一克碳内所包含的放射性碳原子核的数目都是相同的,即都等于 750 亿个。它们衰变时能放出  $\beta$  粒子,其半衰期约为 5730 年,即 2min 内有 17 个 $^{14}\text{C}$ 核发生衰变。随着弱  $\beta$  射线测量方法的不断改进,科学家们有办法测量出它的放射性活度。

在大自然的循环过程中,植物中的 $^{14}\text{C}$ 随同废物一起进入动物的机体。这样生长中的动植物,其中衰变掉的 $^{14}\text{C}$ 是由大气中的二氧化碳所生成的新的 $^{14}\text{C}$ 来补充,所以每克组织中的 $^{14}\text{C}$ 的数目保持不变。但是死亡后的动物或植物其情况就不同了,此时来自大气的放射性碳原子不再补充衰变掉的放射性碳原子,而死亡机体中的放射性碳原子数目是按其衰变规律减少,即约经 5730 年下降一半,经 11460 年减少到 1/4。依此类推,就能根据动植物残骸中 $^{14}\text{C}$ 的含量来确定其死亡时间。考古学家们就是用上述方法来确定各种出土文物、古遗址和具有考古价值遗物的年龄的。例如,我国曾利用该办法对出土越王勾践剑进行过鉴定。

### (2) 在地质学上的应用

在测定含有动物或植物体所形成的许多碳化合物的岩石的年龄时,要求它们不能超过几万年。因为如果在 6 万年前,即约经过 10 个半衰期,这样 $^{14}\text{C}$ 的放射性活度已下降到千分之一,测出它就很困难,实际上也是不可能的。同样,可根据天然放射性核素的衰变规律,以及它在某种特定的化石中的含量,来确定化石的年龄。从此也可以推算出形成矿床和地层的年龄,这比其他各种估计地壳年龄的方法能更精确地得到地质年代或陆地形成的年代,通常称之为“地质钟”,用这种方法可算知地壳的年龄约为 40 亿年。

在地质学上的另一种应用是放射性勘探矿藏。在地质钻孔探矿中,对于不同钻孔深度的岩芯样品分析原是件复杂而繁重的工作。而射线探矿就可以很快帮助地质学家们解决这个问题。对于那些含有放射性元素如铀、钍、钾等的矿层,可直接从放射性活度记录仪器上反映出来。

研究表明:黏土、页岩、磷石灰岩等都有很强的放射性。而煤、砂岩、石灰岩(可能含有石油),以及气体等的放射性是很微弱的。由此可见从放射性的强弱大致上可发现石油矿层。

### (3) 在现代工业中的应用

我们知道由于射线具有强的穿透性,特别是  $\gamma$  射线,它的穿透能力比医学和工业上已用过的 X 射线还要强许多倍。这样,冶金和机械工业就用它来透视各种产品,以达到无损探伤的目的。常用的有 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  射线探伤仪,这种射线能穿透 30cm 厚的铁板。

经过透视可方便地发现各种金属制品中的缺陷,如零件中的裂纹或铸件中的砂眼,特别能及时查出焊缝的质量。更方便的是用射线照相的方法,如在射线通过的路径上有孔隙或裂纹,则  $\gamma$  射线将会畅通无阻,照相底版上就会呈现出黑色。也可用计数器代替照相底版,从计数的强弱中可分析出金属中有无缺陷。

随着中子的发现及其测量技术的发展,现代工业中往往用中子源代替  $\gamma$  源进行中子探伤或称中子照相。由于这种方法具有更多的优点,因此近年来更被广泛采用。

此外,利用同样的原理可对钢板等各种板材的厚度进行自动测量,这种装置称为射线测

厚仪。用它可以控制和保证其生产过程中板材厚度的均匀性。当然也可对各种金属镀层厚度或涂在人造革、漆布和其他纺织品上的颜色、涂料的厚度进行测量；对锅炉内的水位或其他容器内的液位高度也可进行测量，这种装置称为射线液位计；对高速旋转的机器的转速也可进行测量，被称为射线测速仪等。

可用它来检查无法直接观察的设备零件的磨损情况。当磨损情况严重时，放射性核素进入摩擦面，一起磨损被润滑油带走。只要在润滑油所经过的路径上装上记录放射性的计数器，就能及时地发现润滑油内的放射性元素，运行操作人员只要从仪表指示或信号指示上就能很快发现。

根据同样的原理，可使输送石油产品自动化。即在同一根管道中连续输送两种不同产品时，只要在中间注入一种含有放射性核素的制剂，使其与管道的阀门开关相互联系，造成油门的自动转换，就能达到自动输送的目的。当然，同时也可做到放射性检漏，只要把放射性检漏仪放入油管中，如遇上漏油处它就能发出讯号指示出漏油的地方，可做到及时维修。

由于射线的电离本领能杀死各种细菌，所以可利用射线对罐头食品、医疗用品进行消毒，它在食品工业、商业和贮藏保鲜食品等方面也获得了广泛应用。

#### (4) 在农业生产中的应用

辐照育种以达到早熟增产的目的，经过多年的研究证明，辐照后的种子，其生长过程发生了许多变化，其中大多数变化干扰了它们正常生长而发生变异。但是仍有一部分经过突变的生物体在某一方面得到了改善。至今，人们还不能控制或预测它们的变化。

放射性核素示踪剂还可用于合理施肥，即把放射性核素 $^{32}\text{P}$ 混入肥料，观测其根部如何吸收营养，结果发现植物在生长前两三个星期内，其体内 50%~70% 的磷都是从肥料中得到的。另外发现肥料也可被植物的叶部吸收。像磷、氮、钾这些元素从吸收部位运送上去和运送下来的速率，与由根部吸收后的运送速率是相同的。

#### (5) 在医疗卫生方面的应用

放射性核素在生物化学和生理学方面，已愈来愈广泛地被用来研究机体内的新陈代谢作用。如通过示踪原子法对人体的血液循环也进行了研究，因为血液循环的速度能够说明身体的健康状况。一般是注入含有微量放射性钠原子的食盐水，并用能记录 $^{24}\text{Na}$ 所放射的 $\gamma$ 射线的计数器进行测量。结果表明健康成年人的血液循环一周的平均时间约为 22s；2~12 岁的小孩为 11s，而 6 周到 2 岁的小孩只有 7s。

放射性核素在医学上应用的另外一个重要方面是诊断和治疗许多疑难病症。最早应用的是放射性碘对人体的甲状腺进行诊断。而且从甲状腺活动的变化分析中得出，当患有高血压、心脏病、肺病等病症时，甲状腺的功能就失调减退，相反对皮肤病患者，甲状腺功能亢进。一旦健康恢复，其功能亦恢复正常。由此可见，放射性碘不但能帮助诊断病症，并能在治疗过程中检查健康的恢复情况。

放射性核素对外科医生的手术也有帮助。先把示踪原子浓集于患者的病灶处（如甲状腺或肿瘤），这样就能用计数器准确地定出开刀的位置，并能知道切除的干净程度。

放射性同位素的获得和广泛应用是人类智慧的又一伟大创举，它将为社会生产力的进一步发展和提高开阔广阔的前景。如果说 19 世纪主要是蒸汽时代，那么 20 世纪就是电子时代，并已经开始逐步走向核能时代。巨大的核能必将为人类的进步和文明做

出应有的贡献。

## 1.3 放射性的危害及其防护

### 1.3.1 放射性的危害

放射性“三废”是危害最严重的工业废物之一。由于其中含有多种放射性核素，通过自身衰变而放出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  等各种射线，在较大的辐射剂量下，对人体和生物体的组织和器官有不同程度的危害作用。如：脱发、皮肤起红斑、白细胞和血小板减少、白血病、白内障、短寿、影响生殖机能、癌症等。在大剂量照射下，可能导致死亡。人们如果与超剂量的放射性废物接触或者生活在被放射性严重污染的环境中就要遭受其害。

放射性核素在衰变过程中放出  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线，这些射线对人体产生伤害。

$\alpha$  射线（即氦原子核），穿透力较弱，在空气中的射程为 2.5~10cm；在生物组织中的射程为 30~110 $\mu$ m，因此不能穿透人体皮肤层，但电离能力强。对人体的危害主要是内照射，多表现为呼吸道系统疾病，尤其对肺部危害最大。

$\beta$  射线（即高速电子），电离能力较  $\alpha$  射线弱，但穿透力较  $\alpha$  射线强，它们能穿透人的机体，在体外就可引起外照射危害，且对眼睛伤害较大。

$\gamma$  射线（即光子）：衰变过程中产生波长极短的电磁波，能量在 0.04~4 兆电子伏（MeV）之间。穿透力较带电粒子强得多，其照射危害多表现为神经系统和血液系统的疾病。当  $\gamma$  射线剂量很高时，还会造成死亡。

放射线的危害属于电离辐射伤害，电离辐射引起的生物效应大小，受电离辐射的类型、强度、照射方式与条件，以及生物自身的敏感性等因素的影响。电离辐射对生物体的作用分为直接作用和间接作用。直接作用是指生物分子直接受到电离辐射的作用而吸收辐射能量，导致机体损伤；间接作用是指辐射对生物体中的水分子作用，产生活性粒子（氢原子等），活性粒子与生物分子作用而使生物体功能、结构发生损伤。由于生物体内含有大量的水分子，因此电离辐射对生物体的作用主要是间接效应。

电离辐射对生物体的作用过程分为物理、化学和生物学三个阶段。在物理阶段，生物分子和水分子吸收辐射能量而发生电离，产生初级活性粒子；在化学阶段，活性粒子与周围介质反应，生物分子受到损伤；生物学阶段，通过大量微观生物分子损伤，导致宏观的生物损伤效应，如疾患、癌变等。

### 1.3.2 放射性危害的防护

随着核工业的迅速发展，放射性同位素的广泛应用，在放射性矿、核装置，在各种伴生矿的防治及辐射探矿、工业探伤、辐射育种、水文气象、科学研究、医疗应用等方面都使用了各种放射性同位素，在整个核工业系统各个组成部分都利用着各种各样的放射性核素，同时，也产生了各种放射性“三废”。为了防止放射性的危害，保护好环境，保障从事放射性工作人员和居民的健康，必须做好对放射性的防护工作。