

3361

- 852591

—

4014

高等学校教学参考书

# 辐射技术基础

李承华 编  
吴季兰 审

原子能出版社

高等学校教学参考书

# 辐 射 技 术 基 础

李 承 华 编  
吴 季 兰 审

原 子 能 人 民 出 版 社

## 内 容 简 介

辐射技术是原子核科学技术应用的一个重要的组成部分，近年来在许多领域得到了广泛的应用。作者曾在中国科技大学辐射化学专业讲授辐射技术课程多年。本书是作者在其原讲义的基础上作了较大修改和补充而写成的。

全书共九章。前三章介绍电离辐射被物质吸收、减弱的规律，辐射在各种介质中引起的化学效应以及辐射对活细胞和机体的作用。第五、六章概述了辐射在化学、环保、灭菌、保鲜及育种等方面的应用，并结合实际列举了一些典型例子。第四、七、八、九章介绍辐射剂量与剂量测量、辐射源、照射技术与辐射防护。本书内容阐述简明，重点突出，可作为高等院校有关专业和各種辐射工艺训练班的教学参考书，也可供从事辐射技术工作的科技人员参考。

高等学校教学参考书

### 辐 射 技 术 基 础

李承华 编

吴季兰 审

责任编辑 崔朝晖

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

昌平展望印刷厂印刷

(北京市西便门内大街53号)

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售



开本787×1092  $\frac{1}{32}$ ·印张11.75·字数305千字  
1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷  
印数1—1500

统一书号：15175·888 定价：2.05元

---

ISBN 7-5022-0033-9/TL·12(课)

# 前 言

辐射技术是对电离辐射与物质相互作用产生的物理学、化学和生物学效应的规律进行研究、开发和应用的一门新技术，是原子核科学技术的一个重要组成部分。近年来，电离辐射在工业、农业、医疗卫生、环境保护等许多领域得到广泛的应用，不少研究成果实现了实用化与商品化。

为了促进辐射技术应用事业的发展，便于从事该项事业及感兴趣的广大科技人员了解辐射技术的基本原理、工程技术知识和应用概况；也为了给高等学校有关专业和各種辐射工艺训练班提供一本教学参考书，作者对过去为中国科技大学辐射化学专业编写的讲义作了较大的修改和补充写成了这本书。在编写过程中力求内容全面、阐述简明、重点突出。

全书共九章。前三章，即辐射与物质的相互作用，辐射化学效应与辐射生物学效应，着重介绍电离辐射被物质吸收、减弱的规律，辐射在各种介质中引起的化学效应，以及辐射对活细胞与机体的作用。这部分内容是辐射应用的基本原理。

第五、六章为辐射应用，概述了辐射在化学、环境保护、医疗用品灭菌、延长食品保藏期及育种等方面的重要应用，介绍了一些典型例子。读者从这里可以了解到辐射应用的特点与概貌。

第四、七、八、九章包括辐射剂量与剂量测量、辐射源、辐照工艺与辐射防护。这部分内容涉及到辐射应用必需

的基本工具、照射技术、辐照质量控制与环境安全保证，构成了辐射应用的技术基础。

全书承蒙北京大学吴季兰教授审校并作序。部分内容曾经中国科技大学张曼维教授，上海原子核研究所林念芸研究员，长春应用化学研究所张自成研究员，上海科技大学刘玉铭副教授，上海有机化学研究所赵祥臻副研究员审阅。北京师范大学陈文琇副教授曾对本书编写大纲提出过宝贵意见。中国科技大学辐射化学教研室的何坚、王宝章、李希明、奉孝仑、刘占军为本书的编写给予了支持与帮助。作者在此表示衷心的感谢。

由于本书内容广泛，作者水平有限，错误与疏漏在所难免，恳切希望读者提出宝贵意见。

李承华 1986年秋

于北京中国计量科学研究院

## 序

辐射加工工艺是利用核辐射(通常为 $\gamma$ 射线)或电子束等电离辐射作为一种有效手段来生产优质高分子化工材料,使食品长期储存或保鲜,对医疗用品消毒灭菌以及处理工业三废等。

70年代以来,辐射加工逐步在形成一种新的产业。如果把辐射育种、辐射刺激生长等也包括在内,则其内容显得更为广泛。

我国很重视发展辐射加工工艺,某些领域还取得了显著的经济效益。

辐射加工工艺的研究和推广需要多种学科的相互配合,涉及的面很广。研究人员的专业纵然有所分工,但仍需掌握这一领域所涉及的一般知识,这样更可使研究工作得事半功倍之效。为了满足这一需要,也为了解决高等学校有关专业及各种辐射工艺训练班的教材问题,李承华同志总结在中国科技大学多年教授辐射技术课程的经验,在原讲义的基础上,编写了这本书。书的内容较全亦较简明。此外,值得提出的是,在介绍辐射加工这一领域时,作者既描述了这一领域的广阔前景,又力所能及地指出了它所存在的问题及与其他方法的竞争。

希望这本书的出版,能对我国辐射加工的发展起一些积极的促进作用。

吴季兰

1984年7月29日

# 目 录

|                 |    |
|-----------------|----|
| 第一章 辐射与物质的相互作用  | 1  |
| 一、电离辐射          | 1  |
| 1. 重带电粒子        | 1  |
| 2. 高能电子         | 3  |
| 3. 电磁辐射         | 5  |
| 4. 中子           | 6  |
| 二、电磁辐射与物质的相互作用  | 8  |
| 1. 光电效应         | 9  |
| 2. 康普顿效应        | 11 |
| 3. 产生电子对        | 16 |
| 4. 电磁辐射通过物质时的减弱 | 18 |
| 5. 电磁辐射在物质中的吸收  | 23 |
| 三、高能电子与物质的相互作用  | 29 |
| 1. 非弹性碰撞(电离与激发) | 29 |
| 2. 弹性散射         | 32 |
| 3. 韧致辐射         | 32 |
| 4. 高能电子在物质中的吸收  | 33 |
| 5. 次级电子         | 37 |
| 6. 传能线密度——LET   | 41 |
| 四、重粒子与物质的相互作用   | 44 |
| 1. 重带电粒子        | 44 |
| 2. 中子           | 46 |
| 主要参考文献          | 50 |
| 第二章 辐射化学效应      | 51 |
| 一、辐射化学基本反应过程    | 52 |
| 1. 激发分子及其反应过程   | 52 |

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2. 离子及其反应过程 .....       | 53 |
| 3. 自由基及其反应过程 .....      | 54 |
| 4. 溶剂化电子与陷落电子 .....     | 54 |
| 二、水与水溶液的辐解 .....        | 55 |
| 1. 纯水的辐解 .....          | 55 |
| 2. 水辐解中间产物的性质 .....     | 56 |
| 3. 水溶液辐射化学 .....        | 58 |
| (1) 无机水溶液 .....         | 59 |
| (2) 有机物水溶液 .....        | 61 |
| 三、有机物的辐射效应 .....        | 62 |
| 1. 饱和烃、不饱和烃、芳香烃 .....   | 62 |
| 2. 其它有机化合物 .....        | 65 |
| 3. 有机物的辐射化学合成 .....     | 66 |
| 四、辐射聚合 .....            | 68 |
| 1. 辐射聚合反应的机制及影响因素 ..... | 68 |
| 2. 辐射聚合的方法 .....        | 72 |
| 3. 辐射共聚合 .....          | 74 |
| 4. 辐射接枝共聚合 .....        | 75 |
| 五、辐射对聚合物的作用 .....       | 78 |
| 1. 聚合物的辐射交联效应 .....     | 81 |
| 2. 聚合物的辐射裂解效应 .....     | 83 |
| 主要参考文献 .....            | 85 |
| 第三章 辐射生物学效应 .....       | 86 |
| 一、辐射对生物物质的作用 .....      | 88 |
| 1. 氨基酸和肽(缩氨酸) .....     | 89 |
| 2. 蛋白质与酶 .....          | 91 |
| 3. 碳水化合物 .....          | 93 |
| 4. 脂类化合物 .....          | 95 |
| 5. 维生素 .....            | 96 |



|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 二、辐射对活细胞的作用 .....            | 97         |
| 1. 细胞 .....                  | 97         |
| 2. 辐射对细胞结构、功能的作用 .....       | 100        |
| 3. 活细胞的辐射钝化 .....            | 101        |
| 三、辐射与变异 .....                | 104        |
| 1. 辐射对核酸的作用 .....            | 105        |
| 2. 染色体畸变 .....               | 109        |
| 3. 基因突变 .....                | 111        |
| 四、辐射对多细胞机体的作用 .....          | 112        |
| 1. 辐射对植物的作用 .....            | 112        |
| 2. 辐射对动物的作用 .....            | 115        |
| 3. 辐射对人体的作用 .....            | 118        |
| 主要参考文献 .....                 | 123        |
| <b>第四章 辐射剂量与辐射剂量测量 .....</b> | <b>124</b> |
| <b>✓ 一、辐射量 .....</b>         | <b>124</b> |
| 1. 照射量 .....                 | 125        |
| 2. 吸收剂量与比释动能 .....           | 126        |
| 3. 剂量换算 .....                | 129        |
| <b>二、剂量测量 .....</b>          | <b>140</b> |
| 1. 量热法 .....                 | 140        |
| 2. 电离室法 .....                | 142        |
| 3. 液体化学剂量计法 .....            | 147        |
| 4. 固态剂量计法 .....              | 156        |
| 5. 测量输入功率法 .....             | 161        |
| 6. 剂量计的选择与使用 .....           | 165        |
| 7. 辐射剂量测量的标准化 .....          | 169        |
| 主要参考文献 .....                 | 171        |
| <b>第五章 辐射应用(I) .....</b>     | <b>172</b> |
| <b>一、辐射化学应用 .....</b>        | <b>172</b> |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 1. 有机物的辐射合成 .....         | 173 |
| 2. 辐射聚合 .....             | 175 |
| 3. 辐射接枝共聚 .....           | 179 |
| 4. 辐射交联与辐射裂解 .....        | 182 |
| 5. 辐射在生物医学工程中的应用 .....    | 186 |
| 二、辐射处理三废 .....            | 190 |
| 1. 燃烧废气的处理 .....          | 190 |
| 2. 废水处理 .....             | 193 |
| 3. 污泥处理 .....             | 195 |
| 4. 固体废物处理 .....           | 197 |
| 主要参考文献 .....              | 198 |
| <b>第六章 辐射应用(II)</b> ..... | 200 |
| 一、医疗用品的辐射灭菌 .....         | 200 |
| 1. 辐射灭菌的特点 .....          | 201 |
| 2. 辐射剂量与效应的关系 .....       | 202 |
| 3. 微生物的辐射敏感性 .....        | 204 |
| 4. 影响微生物辐射敏感性的因素 .....    | 209 |
| 5. 灭菌剂量的选择与过程的控制 .....    | 212 |
| 二、辐射保藏食品 .....            | 214 |
| 1. 抑制发芽、延迟成熟 .....        | 216 |
| 2. 杀虫与雄虫辐射绝育 .....        | 219 |
| 3. 辐射巴氏杀菌 .....           | 221 |
| 4. 辐射灭菌 .....             | 223 |
| 5. 辐照食品的卫生安全性 .....       | 225 |
| 三、辐射育种 .....              | 227 |
| 1. 辐射育种的特点 .....          | 228 |
| 2. 辐射育种的材料、剂量、影响因素 .....  | 229 |
| 3. 辐射育种后代的选育 .....        | 236 |
| 4. 国内外辐射育种的某些成果与动向 .....  | 239 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 主要参考文献 .....               | 243 |
| <b>第七章 辐射源</b> .....       | 245 |
| 一、核反应堆 .....               | 245 |
| 1. 核反应堆的原理与构造 .....        | 245 |
| 2. 利用核反应堆作辐射源 .....        | 248 |
| 二、核素辐射源 .....              | 250 |
| 1. 放射性衰变与辐射功率 .....        | 250 |
| 2. 作辐射源用的放射性核素 .....       | 251 |
| 3. $\gamma$ 辐射装置 .....     | 255 |
| 三、电子加速器 .....              | 257 |
| 1. 电子静电加速器 .....           | 258 |
| 2. 高频高压发生器 .....           | 259 |
| 3. 绝缘磁芯变压器 .....           | 260 |
| 4. 微波电子直流加速器 .....         | 262 |
| 5. 电子加速器用作 X 射线源 .....     | 263 |
| 6. 电子加速器的使用 .....          | 264 |
| 主要参考文献 .....               | 267 |
| <b>第八章 照射工艺</b> .....      | 268 |
| 一、照射装置 .....               | 268 |
| 1. 基本概念 .....              | 268 |
| 2. 照射装置设计原理 .....          | 269 |
| 3. 剂量分布 .....              | 272 |
| 4. 加工过程的控制 .....           | 273 |
| 二、放射性核素照射装置 .....          | 275 |
| 1. $\gamma$ 辐射场的有关计算 ..... | 275 |
| 2. 静止照射装置 .....            | 278 |
| 3. 单向多道照射装置 .....          | 281 |
| 4. 双向多道照射装置 .....          | 282 |
| 5. 其它形式的照射装置 .....         | 282 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 6. 典型实例 .....              | 283 |
| 三、加速器照射装置 .....            | 286 |
| 1. 近年来的进展 .....            | 286 |
| 2. 电子加速器照射技术 .....         | 289 |
| 3. 加速器照射装置 .....           | 292 |
| 4. 电子加速器产生的 X 射线照射装置 ..... | 295 |
| 5. 典型装置 .....              | 295 |
| 四、照射成本 .....               | 298 |
| 1. 产品 .....                | 300 |
| 2. 选址与运行 .....             | 300 |
| 3. 辐射源 .....               | 302 |
| 主要参考文献 .....               | 305 |
| 第九章 辐射防护 .....             | 306 |
| 一、辐射防护标准 .....             | 306 |
| 1. 剂量当量 .....              | 307 |
| 2. 自然辐射与医疗照射 .....         | 308 |
| √3. 辐射效应与防护标准 .....        | 310 |
| √4. 辐射防护的目的与基本原则 .....     | 311 |
| 5. 危险度与有效剂量当量 .....        | 312 |
| √6. 个人剂量限值 .....           | 314 |
| 7. 内照射危害的限制 .....          | 316 |
| 二、辐射防护方法与计算 .....          | 318 |
| 1. 内照射的防护 .....            | 318 |
| √2. 外照射的防护 .....           | 319 |
| 三、辐射剂量监测 .....             | 327 |
| 1. 场所(环境)监测 .....          | 328 |
| 2. 个人剂量监测 .....            | 331 |
| 3. 剂量监测仪器的校准与选用 .....      | 336 |
| 主要参考文献 .....               | 339 |

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 附录 .....                                           | 341 |
| 一、某些物理常数和单位换算 .....                                | 341 |
| 二、某些辐射量与单位 .....                                   | 343 |
| 三、用于构成国际单位制单位的倍数单位的词头 .....                        | 345 |
| 四、放射性衰变 .....                                      | 346 |
| 五、 $^{60}\text{Co}$ 衰变表 .....                      | 348 |
| 六、各向同性点源的照射量积累系数( $B$ ) .....                      | 349 |
| 七、几种材料屏蔽 $\gamma$ 射线的半减弱厚度 .....                   | 350 |
| 八、电子加速器韧致辐射在混凝土中的屏蔽厚度 .....                        | 351 |
| 九、各向同性点源 $\gamma$ 射线强度减弱 $k$ 倍所需的水屏蔽<br>厚度 .....   | 352 |
| 十、各向同性点源 $\gamma$ 射线强度减弱 $k$ 倍所需的混凝土<br>屏蔽厚度 ..... | 354 |
| 十一、各向同性点源 $\gamma$ 射线强度减弱 $k$ 倍所需的铁屏<br>蔽厚度 .....  | 356 |
| 十二、各向同性点源 $\gamma$ 射线强度减弱 $k$ 倍所需的铅屏<br>蔽厚度 .....  | 358 |
| 十三、部分放射性核素的年摄入量限值及空气和食入<br>的导出浓度 .....             | 360 |

# 第一章 辐射与物质的相互作用

电离辐射照射物质时，通过它与组成物质的分子、原子中的电子或原子核之间的相互作用传递能量，从而引起各种效应。这种传递能量的物理过程不仅是辐射在物质中引起化学效应、生物学效应的基础，也是测量各种辐射量的物理依据。

不同类型的辐射与物质的相互作用过程不同。即使同一种辐射，往往也因能量差异而以不同的方式与物质相互作用。此外，辐射与物质相互作用的方式和程度与被作用物质的本质(原子序数)也有密切的关系。

## 一、电 离 辐 射

电离辐射通常指的是那些能直接地或间接地通过初级或次级过程而使物质产生电离效应的辐射。具有足够大的动能以致能直接引起电离的带电粒子称为直接电离粒子，如正负电子、质子、 $\alpha$ 粒子等。凡是能够释放出直接电离粒子或引起核转变的不带电粒子称为间接电离粒子。表 1.1 中列举了常见的几种电离辐射以及它们的特性。

### 1. 重带电粒子

常见的重带电粒子有质子、氦核、 $\alpha$ 粒子、裂变碎片等，它们带有不同数量的正电荷，质量比电子大得多。这里以 $\alpha$ 粒子为例，作些简单的介绍。

表 1.1 某些常见的电离辐射及其特性

| 名 称          | 符 号               | 电 荷    | 静止质量*      |
|--------------|-------------------|--------|------------|
| 电磁辐射         | $\gamma$ 或 X      | 0      | 0          |
| 电 子          | e 或 $\beta$       | -1     | 0.00548597 |
| 正 电 子        | $e^+$ 或 $\beta^+$ | +1     | 0.00548597 |
| $\mu$ 介子     | $\mu^\pm$         | +1, -1 | 0.113432   |
| $\pi$ 介子     | $\pi^\pm$         | +1, -1 | 0.149848   |
| 质 子          | p                 | +1     | 1.0072766  |
| 中 子          | n                 | 0      | 1.0086654  |
| 氘 核          | d (D)             | +1     | 2.0135536  |
| $\alpha$ 粒 子 | $\alpha$          | +2     | 4.0015064  |
| 裂变碎片         | FP                | 20—22  | ~95—139    |

\* 原子质量单位

表 1.2 能量为 1 MeV 的电离辐射的射程(近似值)

| 辐射类型         | 射 程 (cm) |       |
|--------------|----------|-------|
|              | 水 中      | 空气中   |
| $\beta$ 或 e  | 0.5      | 400   |
| X 或 $\gamma$ | 10*      | 7000* |
| 中 子          | 1.5*     | 大*    |
| 质 子          | 0.002    | 2.25  |
| $\alpha$     | 0.0005   | 0.5   |
| FP(100 MeV)  | 0.01     | 2.5   |

\* 为半减弱厚度, 即射线强度降低一半时吸收物质的厚度。

$\alpha$  粒子是放射性核素放射出来的高速飞行的高速原子核, 它带两个正电荷, 质量接近 4。 $\alpha$  射线通过物质时主要与处于径迹附近的分子或原子中的电子碰撞, 引起激发与电离而损失能量。由于  $\alpha$  粒子的质量大, 它每次与电子碰撞只损失

很少一部分能量，需要通过多次碰撞，速度才逐渐减慢，而且基本不改变方向。 $\alpha$  粒子损失的能量使得粒子径迹附近形成大量的激发分子与离子，例如  $^{210}\text{Po}$  衰变产生的一个能量为  $5.6 \text{ MeV}^*$  的  $\alpha$  粒子通过  $3.8 \text{ cm}$  的空气层被阻停时总共产生约  $150000$  个离子对和更多的激发分子。放射性核素发射的  $\alpha$  粒子能量是单一的，范围在  $4\text{—}10 \text{ MeV}$  之间，在空气中能穿行  $2\text{—}8 \text{ cm}$ 。一定能量的  $\alpha$  粒子在同一物质中穿过的最大距离(即射程)大体上是相同的。

## 2. 高能电子

高能电子包括放射性核素核转变时释放出的  $\beta$  射线(电子或正电子)及电子加速器产生的能量接近单一的电子束。它们本质上都是电子，带有单位电荷，静止质量约为氢原子量的  $1/1840$ 。但是  $\beta$  射线的能量不是单一的，而是具有从零到某一最大值之间的连续分布(见图 1.1)。分布曲线的极大值一般处于最大能量  $E_\beta$  的  $1/3$  附近，由于处于  $E_\beta$  的粒子数非常少，实际应用中往往采用平均能量  $\bar{E}_\beta$ ，通常  $\bar{E}_\beta$  为  $E_\beta$  的  $1/2$  到  $1/3$  之间。一般放射性核素的  $\beta$  射线的  $E_\beta$  为  $0.015\text{—}2 \text{ MeV}$ ，目前辐射加工应用中常用的电子加速器产生的电子能量一般在  $0.2\text{—}10 \text{ MeV}$  之间。

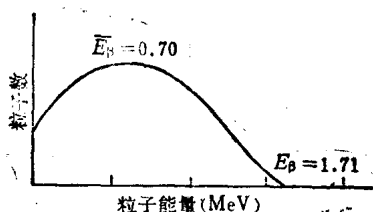


图 1.1  $^{32}\text{P}$  的  $\beta$  粒子能谱

与重带电粒子类似，高能电子通过物质时主要与电子相碰撞而损失能量，从而引起物质中分子或原子的激发与电离。

\*  $\text{MeV}$  是一种常用的能量单位，其值相当于一个电子在真空中通过一百万伏特电位差加速所获得的动能。 $1 \text{ MeV} \approx 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ 。



但与重带电粒子不同，由于电子质量小，它与介质中的电子碰撞时不仅会失去较多的能量，而且运动方向会发生大角度偏转，径迹十分曲折。电子质量小，与具有同样能量的重带电粒子相比运动速度快得多，与物质的相互作用比较弱穿透能力较强，射程较大(参看表 1.2)。

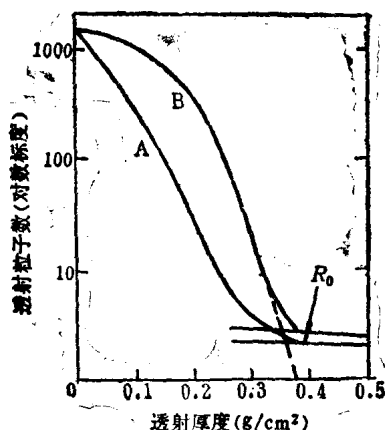


图 1.2  $\beta$  射线(A) 与相当  $E_\beta$  能量的单能电子束 (B) 的透射曲线

图 1.2 中的曲线表明，随着吸收物厚度增加透射的电子数目下降。透射曲线的具体形状不仅依赖于电子束的能量分布而且与源、吸收物和探测器之间的几何位置有关。 $\beta$  射线的最大射程  $R_0$  与能量和  $E_\beta$  相同的单能电子束的外推射程几乎相同，但它们在物质中的透射情况有所差别。 $\beta$  射线由于含有大量低能电子，故吸收比单能电子快。曲线的水平部分(本底)是由穿透能力比电子强得多的宇宙射线、环境  $\gamma$  射线及电子在物质中被原子核库仑场阻滞时产生的 X 射线造成的。

• • •