

# 核反应堆燃料元件

冶金与加工

[美] A. R. 考夫曼

原子能出版社

## 内 容 简 介

本文较详尽地论述了核反应堆燃料元件的性能、加工、检验和运行情况。内容包括：与反应堆有关的核物理和燃料元件基本概念；铀、二氧化铀和包壳材料的性能；元件芯体与包壳的相容性；辐照对芯体的影响；燃料元件在堆内的运行状态；芯体材料的加工方法；燃料元件的密封包装技术；燃料元件组装和检验。附录中给出了部分铀合金相图。本书可供从事核反应堆燃料元件设计、科研和生产的科技人员以及大专院校有关专业的师生参考。

Albert R. Kaufmann (ed.)

NUCLEAR REACTOR FUEL ELEMENTS Metallurgy and Fabrication

Interscience Publishers, 1962

核反应堆燃料元件

冶金与加工

[美]A. R. 考夫曼 主编

陈林福、韦烽译

李恒德 范玉殿 柳百新 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张27<sup>1</sup>/<sub>8</sub>·字数648千字

1980年12月第一版·1980年12月第一次印刷

印数001—900·统一书号:15175·249

定价:3.85元

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| <b>第一章 核裂变能</b>         | 1  |
| 1-1 引言                  | 1  |
| 1-2 原子结构和同位素            | 1  |
| 1-2-1 原子结构              | 1  |
| 1-2-2 同位素               | 1  |
| 1-3 放射性                 | 2  |
| 1-3-1 放射性同位素            | 2  |
| 1-3-2 放射衰变              | 3  |
| 1-3-3 放射半衰期             | 3  |
| 1-4 中子反应                | 4  |
| 1-4-1 中子-核反应的类型         | 4  |
| 1-4-2 弹性散射              | 4  |
| 1-4-3 非弹性散射             | 5  |
| 1-4-4 中子俘获反应            | 5  |
| 1-4-5 核截面               | 6  |
| 1-5 裂变过程                | 6  |
| 1-5-1 核裂变               | 6  |
| 1-5-2 裂变中子              | 6  |
| 1-5-3 裂变能               | 7  |
| 1-5-4 裂变产物              | 8  |
| 1-5-5 裂变材料的生产           | 8  |
| 1-6 核反应堆                | 9  |
| 1-6-1 反应堆构造的一般特征        | 9  |
| 1-6-2 临界质量              | 10 |
| 1-6-3 快中子反应堆和增殖反应堆      | 11 |
| 1-6-4 热中子和超热中子反应堆、增殖反应堆 | 12 |
| <b>参考文献</b>             | 13 |
| <b>第二章 燃料元件诸问题</b>      | 14 |
| 2-1 引言                  | 14 |
| 2-2 核燃料                 | 14 |
| 2-3 燃料元件的运行条件           | 15 |
| 2-3-1 包壳                | 15 |
| 2-3-2 热迁移               | 16 |
| 2-3-3 辐照损伤              | 18 |
| 2-4 燃料元件设计方面的限制因素       | 19 |
| 2-4-1 包壳成分              | 20 |
| 2-4-2 燃料成分              | 21 |
| 2-4-3 冷却剂同燃料的关系         | 21 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 2-4-4 燃料尺寸                 | 22 |
| 2-4-5 燃料寿命                 | 22 |
| 2-5 决定燃料元件寿命的因素            | 23 |
| 2-5-1 燃料的贫化                | 23 |
| 2-5-2 包壳腐蚀                 | 24 |
| 2-5-3 燃料芯体的暴露              | 24 |
| 2-5-4 燃料的畸变                | 27 |
| 2-6 反应堆的灾难性事故              | 27 |
| 第三章 铀及其合金                  | 29 |
| 3-1 引言                     | 29 |
| 3-2 金属铀的制取                 | 29 |
| 3-2-1 真空铸造和浓缩铀             | 29 |
| 3-2-2 高纯金属铀                | 30 |
| 3-2-3 分析                   | 30 |
| 3-3 物理性质和热学性质              | 32 |
| 3-4 物理冶金                   | 33 |
| 3-4-1 结晶学和同素异构转变           | 33 |
| 3-4-2 塑性变形机制               | 35 |
| 3-4-3 $\alpha$ 铀的组织        | 37 |
| 3-4-4 择优取向对性能的影响           | 41 |
| 3-4-5 金相和X射线衍射技术           | 43 |
| 3-4-6 回复、再结晶和晶粒长大          | 45 |
| 3-4-7 相变对组织和晶粒度的影响         | 47 |
| 3-4-8 $\beta$ 处理对组织和晶粒度的影响 | 49 |
| 3-4-9 $\beta$ 处理时的尺寸变化     | 51 |
| 3-4-10 细化铸态铀晶粒的热处理         | 52 |
| 3-4-11 晶粒度比较               | 52 |
| 3-4-12 机械性能                | 53 |
| 3-5 铀合金                    | 57 |
| 3-5-1 合金化行为                | 57 |
| 3-5-2 合金元素对晶粒度的影响          | 58 |
| 3-5-3 铀-铝合金                | 59 |
| 3-5-4 铀-铍合金                | 62 |
| 3-5-5 铀-铬合金                | 62 |
| 3-5-6 铀-钒合金                | 64 |
| 3-5-7 铀-钼合金                | 66 |
| 3-5-8 铀-铌合金                | 70 |
| 3-5-9 铀-硅合金                | 71 |
| 3-5-10 铀-锆合金               | 72 |
| 3-6 腐蚀                     | 78 |
| 3-6-1 腐蚀反应                 | 78 |
| 3-6-2 空气中的腐蚀               | 78 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 3-6-3 铀在水中的腐蚀        | 79  |
| 3-6-4 合金元素对铀在水中腐蚀的影响 | 80  |
| 参考文献                 | 83  |
| <b>第四章 二氧化铀</b>      | 89  |
| 4-1 引言               | 89  |
| 4-1-1 陶瓷燃料的优缺点       | 89  |
| 4-1-2 应用             | 90  |
| 4-2 陶瓷体制备的原则         | 90  |
| 4-2-1 概要             | 90  |
| 4-2-2 压实和烧结          | 91  |
| 4-3 二氧化铀             | 92  |
| 4-3-1 结构和性质          | 92  |
| 4-3-2 二氧化铀粉末的化学制备    | 94  |
| 4-3-3 二氧化铀粉末的物理处理    | 97  |
| 4-3-4 加工技术           | 98  |
| 4-4 二氧化铀的性能          | 107 |
| 4-4-1 与冷却剂的相容性       | 107 |
| 4-4-2 辐照尺寸稳定性        | 108 |
| 4-4-3 热学性能           | 108 |
| 4-4-4 裂变产物的保留        | 111 |
| 4-4-5 其它各种效应         | 112 |
| 4-5 铀的其它化合物          | 113 |
| 参考文献                 | 117 |
| <b>第五章 包壳材料</b>      | 120 |
| 5-1 引言               | 120 |
| 5-2 反应堆环境的独特要求       | 121 |
| 5-2-1 核子性能           | 121 |
| 5-2-2 辐照稳定性          | 122 |
| 5-3 已在应用的包壳材料的比较     | 122 |
| 5-3-1 抗腐蚀性           | 123 |
| 5-3-2 机械性能           | 124 |
| 5-4 铝                | 125 |
| 5-4-1 腐蚀             | 125 |
| 5-4-2 机械性能和加工        | 127 |
| 5-4-3 改良合金           | 127 |
| 5-5 锆                | 128 |
| 5-5-1 腐蚀             | 128 |
| 5-5-2 锆中的氢           | 130 |
| 5-5-3 机械性能和加工        | 131 |
| 5-5-4 改良合金           | 132 |
| 5-6 镁                | 132 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5-6-1 腐蚀 .....               | 132 |
| 5-6-2 机械性能和加工 .....          | 133 |
| 5-6-3 改良合金 .....             | 134 |
| 5-7 不锈钢 .....                | 134 |
| 5-7-1 腐蚀 .....               | 134 |
| 5-7-2 机械性能和加工 .....          | 136 |
| 5-7-3 改良合金 .....             | 136 |
| 参考文献 .....                   | 137 |
| <b>第六章 芯体与包壳的相互作用</b> .....  | 141 |
| 6-1 引言 .....                 | 141 |
| 6-1-1 机械结合 .....             | 141 |
| 6-1-2 直接的冶金结合 .....          | 141 |
| 6-1-3 中间层结合 .....            | 141 |
| 6-2 芯体-包壳组合中的重要因素 .....      | 142 |
| 6-2-1 加工相容性 .....            | 142 |
| 6-2-2 尺寸稳定性 .....            | 142 |
| 6-2-3 导热性 .....              | 142 |
| 6-2-4 腐蚀稳定性 .....            | 143 |
| 6-2-5 芯体与包壳的相互扩散 .....       | 143 |
| 6-3 芯体-包壳组合的例子 .....         | 146 |
| 6-3-1 用铝包覆的铀和铀合金燃料元件 .....   | 146 |
| 6-3-2 用锆和锆合金包覆的金属燃料元件 .....  | 154 |
| 6-3-3 用不锈钢包覆的铀和铀合金燃料元件 ..... | 162 |
| 6-3-4 用金属包覆的陶瓷燃料元件 .....     | 163 |
| 参考文献 .....                   | 169 |
| <b>第七章 裂变材料的辐照行为</b> .....   | 173 |
| 7-1 引言 .....                 | 173 |
| 7-1-1 问题的概述 .....            | 173 |
| 7-1-2 燃耗单位 .....             | 174 |
| 7-2 尺寸不稳定性 .....             | 175 |
| 7-2-1 裂变损伤 .....             | 175 |
| 7-2-2 肿胀 .....               | 177 |
| 7-2-3 其它尺寸不稳定性来源 .....       | 183 |
| 7-3 金属燃料辐照行为的一般论述 .....      | 183 |
| 7-3-1 铀的各向异性生长 .....         | 184 |
| 7-3-2 铀在辐照下的蠕变 .....         | 186 |
| 7-3-3 相逆变 .....              | 188 |
| 7-3-4 金属燃料的肿胀 .....          | 189 |
| 7-4 金属燃料 .....               | 196 |
| 7-4-1 铀 .....                | 196 |
| 7-4-2 铀合金 .....              | 205 |
| 7-4-3 克服肿胀的办法 .....          | 216 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 7-5 弥散燃料               | 216 |
| 7-5-1 材料选择             | 217 |
| 7-5-2 裂变弥散相的颗粒度        | 217 |
| 7-5-3 弥散相与基体的相容性       | 219 |
| 7-5-4 辐照行为             | 220 |
| 参考文献                   | 223 |
| <b>第八章 燃料元件设计的堆工问题</b> | 231 |
| 8-1 引言                 | 231 |
| 8-2 物理、辐照损伤及腐蚀的某些考虑    | 233 |
| 8-3 传热学基础              | 233 |
| 8-3-1 结合状态的考虑          | 234 |
| 8-3-2 燃料内部的热传导         | 236 |
| 8-3-3 强制对流传热           | 239 |
| 8-3-4 沸腾               | 239 |
| 8-3-5 烧毁               | 240 |
| 8-4 流体力学基础             | 241 |
| 8-4-1 自然循环沸腾           | 241 |
| 8-4-2 非沸腾系统中的压降        | 242 |
| 8-5 热管因子的影响            | 244 |
| 8-6 通量分布不均匀的影响         | 245 |
| 8-7 反应堆可能的瞬态过程对设计工况的影响 | 248 |
| 8-8 热应力                | 249 |
| 8-9 结论                 | 250 |
| 参考文献                   | 251 |
| <b>第九章 芯材加工</b>        | 253 |
| 9-1 引言                 | 253 |
| 9-2 熔炼和铸造              | 253 |
| 9-2-1 熔炼炉              | 253 |
| 9-2-2 铀的熔炼             | 256 |
| 9-2-3 铀合金熔炼            | 258 |
| 9-2-4 健康、安全和物料平衡       | 261 |
| 9-3 粉末冶金加工             | 262 |
| 9-3-1 铀及其合金            | 263 |
| 9-3-2 金属陶瓷型燃料元件        | 265 |
| 9-3-3 设备               | 266 |
| 9-3-4 健康和 安全           | 266 |
| 9-4 压力加工               | 267 |
| 9-4-1 轧制               | 267 |
| 9-4-2 锻造               | 276 |
| 9-4-3 挤压               | 278 |
| 9-4-4 其它加工方法           | 282 |
| 9-5 熔焊                 | 284 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 9-6 切削加工 .....            | 285 |
| 9-6-1 铀 .....             | 285 |
| 9-6-2 健康和 安全 .....        | 288 |
| 参考文献 .....                | 290 |
| <b>第十章 包覆和结合技术</b> .....  | 293 |
| 10-1 引言 .....             | 293 |
| 10-2 机械结合 .....           | 294 |
| 10-2-1 滑动配合 .....         | 294 |
| 10-2-2 静液压和热气压包覆 .....    | 295 |
| 10-2-3 电缆挤压 (挤压包覆) .....  | 300 |
| 10-2-4 旋转锻造 .....         | 304 |
| 10-2-5 拉拔 .....           | 306 |
| 10-3 直接冶金结合 .....         | 307 |
| 10-3-1 轧制结合 .....         | 307 |
| 10-3-2 挤压结合 (共挤) .....    | 314 |
| 10-3-3 铸造结合 .....         | 323 |
| 10-4 间接或中间层结合 .....       | 327 |
| 10-4-1 铝-硅法 .....         | 327 |
| 10-4-2 热压包覆 .....         | 332 |
| 10-5 液体金属结合 .....         | 334 |
| 10-5-1 一般考察 .....         | 334 |
| 10-5-2 程序 .....           | 335 |
| 10-6 端部密封和封顶 .....        | 337 |
| 10-6-1 焊接 .....           | 337 |
| 10-6-2 钎焊 .....           | 341 |
| 10-6-3 点密封技术 .....        | 344 |
| 10-6-4 旋转模锻 .....         | 345 |
| 10-7 附录 .....             | 346 |
| 10-7-1 铀的电镀程序 .....       | 346 |
| 10-7-2 轧制结合加工程序详述 .....   | 348 |
| 参考文献 .....                | 356 |
| <b>第十一章 燃料组件概念</b> .....  | 361 |
| 11-1 引言 .....             | 361 |
| 11-1-1 燃料组件的定义 .....      | 361 |
| 11-1-2 燃料组件的用途 .....      | 361 |
| 11-2 组装燃料组件用的材料 .....     | 362 |
| 11-2-1 金属材料的选择 .....      | 362 |
| 11-2-2 燃料组件组装中金属的焊接 ..... | 363 |
| 11-2-3 燃料组件中材料的种类 .....   | 363 |
| 11-2-4 燃料组件的尺寸及应力控制 ..... | 363 |
| 11-3 棒状元件组成的燃料组件 .....    | 364 |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 11-3-1 结构 .....            | 364 |
| 11-3-2 焊接方法 .....          | 368 |
| 11-3-3 检查方法 .....          | 369 |
| 11-4 板状元件组成的燃料组件 .....     | 369 |
| 11-4-1 结构 .....            | 370 |
| 11-4-2 焊接或组装方法 .....       | 371 |
| 11-5 管状元件组成的燃料组件 .....     | 373 |
| 11-5-1 管状元件的排列方式 .....     | 373 |
| 11-5-2 组件接头 .....          | 374 |
| 11-6 复杂元件组成的燃料组件 .....     | 374 |
| 11-6-1 结构 .....            | 374 |
| 11-6-2 焊接或组装方法 .....       | 375 |
| 参考文献 .....                 | 376 |
| <b>第十二章 检查和试验</b> .....    | 378 |
| 12-1 核燃料元件检查和试验的必要性 .....  | 378 |
| 12-2 燃料元件需检查和试验的项目 .....   | 378 |
| 12-2-1 成份 .....            | 378 |
| 12-2-2 完善程度 .....          | 379 |
| 12-2-3 形状和尺寸 .....         | 379 |
| 12-3 加工流程中检查和试验的几个阶段 ..... | 380 |
| 12-3-1 原料 .....            | 380 |
| 12-3-2 原料加工 .....          | 380 |
| 12-3-3 元件加工 .....          | 380 |
| 12-3-4 燃料组件 .....          | 380 |
| 12-4 检查和试验方法 .....         | 380 |
| 12-4-1 贯穿辐射 .....          | 382 |
| 12-4-2 声波和超声波 .....        | 389 |
| 12-4-3 渗透和压力 .....         | 393 |
| 12-4-4 电磁法 .....           | 395 |
| 12-4-5 光学 .....            | 401 |
| 12-4-6 热学 .....            | 402 |
| 12-4-7 化学 .....            | 403 |
| 12-4-8 机械测量 .....          | 405 |
| 12-4-9 检查和试验的一般原则 .....    | 408 |
| 参考文献 .....                 | 410 |
| 附录 相图 .....                | 416 |
| 参考文献 .....                 | 424 |

# 第一章 核裂变能

S. 格拉斯顿 (Glasstone)

## 1-1 引 言

随着世界人口的连续增多,生活水平的不断提高,每年消耗的总能量也在迅速增加。近年来可以清楚地看出,甚至在可以预见的将来,水力资源和矿物燃料,即煤、石油和天然气等,都不能满足人类对能量的需求。事实上,一些工业高度发展的国家,如英国和日本,矿物燃料已经不足。核裂变能的发现,打开了一种新的具有极大重要性的动力源泉,其燃料材料的性质完全是新异的,基本能源是元素铀和钍,而不是煤和石油。

释放能量的装置称为原子核反应堆。大多数反应堆里的核燃料(或反应堆燃料)是固态的,由其构成的结构单元称之为燃料元件。反应堆燃料材料的制备引入了许多新而有趣,但常常又是困难的冶金学问题。除此之外,制造燃料元件要求发展特殊的加工技术。本章的目的是介绍原子核反应堆设计和运行的基本原理,提供解释本书后面各章论述核燃料元件的冶金和加工等内容所必需的基础知识。

## 1-2 原子结构和同位素<sup>[1]</sup>

### 1-2-1 原子结构

按照原子结构的近代模型,每一个原子都由一个带正电的位于中心的核和一些围绕着它旋转的带负电的电子所构成,因此,整个看来,原子是电中性的。除氢原子核只带有单位电荷称为质子外,其它各种原子的核都含有质子和中子。中子,顾名思义,是电中性的粒子。所以,原子核所带正电荷的多少只决定于质子数。按照常用的原子质量单位,质子和中子的质量都略大于1。

原子核内的质子数称为原子序数,它是每种元素的一个特征性质,并且同周期表上元素的位置序数相等。于是,周期表上第一个即最轻的元素氢,它的原子序数是1,而铀——自然界发现的最重的元素,它的原子序数是92。原子序数更高的十几种元素是用人工方法制造出来的,其中原子序数为94的钚对于释放核裂变能来说是特别令人感兴趣的。

### 1-2-2 同 位 素

原子核内的质子数和中子数的总和,称为核类的质量数。以原子序数即质子数为表征的元素,其原子核常常具有两种或更多种含不同中子数的形态。这些形态的原子序数相同,但质量数不同,称为元素的同位素。例如,铀有几种同位素形态,其中天然存在的最重要的同

位素，其质量数分别为 235 和 238，称为 $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ 。较轻的铀同位素 $^{235}\text{U}$ 在天然铀里的含量是 0.71 重量%，余者几乎全是 $^{238}\text{U}$ （还有极微量的 $^{234}\text{U}$ 和更微量的铀的其它同位素）。

我们有趣地注意到，在自然界里， $^{235}\text{U}$ 是唯一能够直接用于释放核裂变能的同位素（ $^{238}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 只能间接地被利用）。当 $^{235}\text{U}$ 原子核吸收一个中子时，就会有相当大的几率分裂成两个较轻的核，与此同时，释放出相当巨大的能量，这就是将在第 1-5 节比较详尽地叙述的裂变过程。 $^{235}\text{U}$ 原子核加上被吸收中子的质量，超过全部裂变产物的质量，这是能量释出的本源。根据爱因斯坦 1905 年定量建立的质量和能量之间的关系，裂变过程中的质量亏损被等量的能量释放所补偿。

一个给定元素的所有同位素，除了放射性、中子俘获和裂变等特殊的核性质不同外，其它性质基本相同。从核燃料元件的冶金和加工观点来看，这一点是很重要的。因此，如果 $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ 在相的特性、晶体构造、冶金学性质和机械性质等方面即使有所不同的话，那也因差别太小而没有什么实际的意义。正因为这个原因，在后面的章节里论述铀及其合金的性质时，并不区别某一具体元素的同位素，所得的结果基本上与所考虑材料的同位素成分无关。燃料元件上所用铀的成分范围可以从天然铀的大约 0.7%  $^{235}\text{U}$  到高浓缩铀的 90%  $^{235}\text{U}$ 。这些材料的冶金学特性基本相同，然而其核性质，如裂变，却非常不同。所以，在操作浓缩铀的时候必须采取特殊的措施。

## 1-3 放射性

### 1-3-1 放射性同位素

自然界的元素除 20 种外都有着两种或更多种同位素形态，致使核类或核素的总数增加到约 325 个。其中，稳定核素略多于 270 个，不稳定的即放射性核素约为 50 个。稳定同位素里的中子数和质子数的函数关系示于图 1-1，它表明在较重的原子核里，有着中子数超过质子数的趋势。因此，当铀原子分裂成两个较轻元素的时候，多余的中子可以用来分裂其它的原子。原子序数等于或大于 84 的元素（从钋开始）都以放射性核素的形态存在着，所以图 1-1 上没有表示这些元素。原子序数为 81（铊）、82（铅）和 83（铋）的元素在自然界里主要以稳定核素的形态存在着，同时也有着少量的不稳定核素。少数较轻的基本上稳定的元素，特别是钾，也有极微量的放射性同位素。除了自然界里发现的放射性核素外，在实验室里用包括裂变在内的各种核反应已经制造出近 900 种不稳定的同位素<sup>●</sup>。

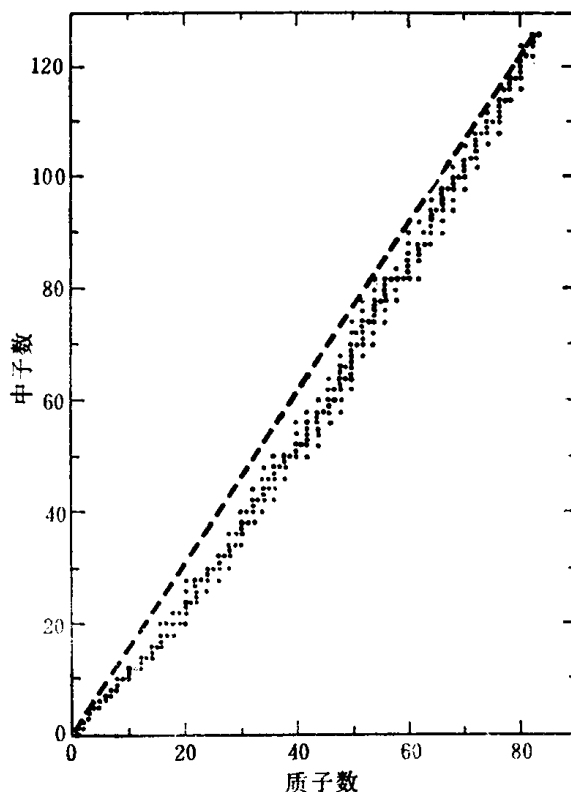


图1-1 稳定核里中子和质子的数目

● 根据原子能出版社1977年出版的《核素常用数据表》统计，目前制造出的不稳定同位素约有1500种。——译者注

### 1-3-2 放射衰变

不稳定原子核的放射变化（或放射衰变）过程可以视为一种向增加稳定性的方向进行的核变化。因此，在一个中子数和质子数的比例不同于图 1-1 的比值的同位素内，原子核将变得不稳定，并将通过放出一个粒子而衰变到比较稳定的状态。在大多数情况下，放射性的核或者放出 1 个  $\alpha$  粒子，或者放出 1 个  $\beta$  粒子。前者是氦核，后者是电子。质子过多的不稳定核放出正  $\beta$  粒子，中子过多的不稳定核放出负  $\beta$  粒子。就其一般的行为而言，在正  $\beta$  粒子和负  $\beta$  粒子发射体之间并没有什么不同，但是，现在我们只对后者感兴趣。在很少的情况下，不稳定核素能够通过放出 1 个中子而达到稳定，这种现象虽很稀少，但对核裂变反应堆的控制却是极端重要的。

随着放射变化还常常出现  $\gamma$  射线的发射。 $\gamma$  射线是与 X 射线类似的高能电磁贯穿辐射的一种形式。实际上， $\gamma$  射线与 X 射线的唯一差别在于，前者因核过程而发生，而后者因核外的变化而发生。 $\gamma$  射线的能量通常比 X 射线高，波长通常比 X 射线短，但是相反的情形也是有的。 $\gamma$  射线的发生可以伴随放射性以外的许多核过程。在许多情况下，生成的核处于内能比稳定态要高得多的状态（激发态），激发态的过剩能量随后以  $\gamma$  辐射粒子（光子）的形式发射出来。正如在后面将要看到的（第 1-4-4 节），原子核俘获 1 个中子所发生的反应，包括裂变，常常伴随  $\gamma$  射线的发射。

射线进入身体内部，有可能危害健康，为此，了解  $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子和  $\gamma$  射线从其源体发出后能够行进多大距离是重要的。 $\alpha$  粒子的射程决定于能量；但是，由放射源放出的  $\alpha$  经过 1—3 英寸厚的空气就停止下来，变得没有什么危害； $\alpha$  粒子不能穿透薄的纸片或铝箔。在给定的介质中与相同能量的  $\alpha$  粒子比较起来， $\beta$  粒子能够行进较大的距离，但是在中等或高密度的物体里，能相当容易地被停止下来。然而， $\gamma$  射线的情况却截然不同，它在空气里能穿透相当大的距离，甚至对致密的材料也能穿透一定的厚度。与  $\alpha$  粒子和  $\beta$  粒子不同， $\gamma$  射线永远也不会完全停止下来，只能依靠距离或穿过致密物体，如混凝土、铁和铅等，使其减弱到对身体不再有什么重大的危害性。

1 个放射性核放出 1 个  $\alpha$  粒子或  $\beta$  粒子后就转变为另一种元素的核，我们常称之为子元素（或产物）。后者可能也并不十分稳定，于是，象其母元素一样，也具有放射性。经过一系列的放射性蜕变阶段以后，生成了一种稳定的非放射性核素，作为特定蜕变链的最终产物。

### 1-3-3 放射半衰期

某一核素的放射性衰变率决定了  $\alpha$  粒子或  $\beta$  粒子，以及许多情况下也包括  $\gamma$  射线的发射率。放射性衰变率常用半衰期来表示。半衰期的定义是，放射性核初始数目的一半转变为蜕变产物所需的时间。任何一种放射性物质都有一个特征的与数量和状态无关的半衰期。已测得的各种放射性物质的半衰期范围由十亿分之几秒到几十亿年不等。半衰期更短或更长的核素无疑是可能存在的。

可以直接或间接当核燃料用的核素的某些数据示于表 1-1 上。这些物质都是半衰期很长的  $\alpha$  发射体。半衰期长对于这些物质是非常重要的，这意味着在几百年的贮藏中，不会有可

观的损耗。我们感兴趣的是，当半衰期最短的燃料 $^{239}\text{Pu}$ 蜕变时，其子元素是半衰期很长的 $^{235}\text{U}$ ，由于后者也是核燃料，所以，作为能源来说，材料的有用价值并没有什么损失。

表 1-1 所包括的各种核素的放射衰变都伴随一些  $\gamma$  辐射。但是半衰期很长（即蜕变率很低），并且是低能辐射，所以，这些物质的  $\gamma$  射线的活性一般并不严重。然而，在后面我们将看到，反应堆里每次装载的燃料都不会全部被用完，因此，需要回收未消耗的燃料。在回收的燃料材料里含有强烈的  $\gamma$  射线发射体，在用这种材料制造反应堆燃料元件时，为了防止  $\gamma$  辐射对身体的危害，须采用特殊的操作方法。

表 1-1 核燃料同位素的放射特征

| 核 素               | 放 射 性    | 半衰期，年                 |
|-------------------|----------|-----------------------|
| $^{232}\text{Th}$ | $\alpha$ | $1.39 \times 10^{10}$ |
| $^{233}\text{U}$  | $\alpha$ | $1.62 \times 10^5$    |
| $^{235}\text{U}$  | $\alpha$ | $7.13 \times 10^8$    |
| $^{238}\text{U}$  | $\alpha$ | $4.51 \times 10^9$    |
| $^{239}\text{Pu}$ | $\alpha$ | $2.44 \times 10^4$    |

与表 1-1 上所示的燃料核素不同，几乎所有的在裂变过程中生成的原子核都呈现负  $\beta$  衰变，而且常常伴随着  $\gamma$  射线的发射。遵照其各自的本性，在稳定的最终产物生成之前，这些核素分别经历 1 至 6 个放射蜕变阶段，加权平均值接近于 3。直接裂变产物及其子元素的半衰期范围约为百万分之一秒到几百万年。结果是，虽然某些裂变产物的蜕变非常迅速，但是另外一些却相当缓慢，因此， $\beta$  质点和  $\gamma$  射线的发射将在长时间内持续地进行，其强度随时间而减弱。

## 1-4 中子反应

### 1-4-1 中子-核反应的类型

以放射性为表征的自发核反应是原子核通过放出一个粒子而转变成另一种原子核。除了这种核反应之外，还能够使原子核吸收这种或那种粒子而人工地进行多种核反应。在这些核反应中，那些吸收中子的核反应特别引起人们的兴趣。中子一般都被束缚在原子核内，但是也可以得到自由状态的中子，因此可以研究它同物质的交互作用。除了裂变过程之外，在核反应堆运行过程中有三种重要的中子-原子核交互作用的类型。除了生成新核的吸收反应外，还有两种类型的散射碰撞，即弹性碰撞和非弹性碰撞，这种散射碰撞只在中子和原子核之间造成能量的交换。

### 1-4-2 弹 性 散 射

弹性散射可以当作是一种在中子和原子核碰撞时发生动能传递的纯粹机械碰撞过程。这种交互作用之所以称为散射，是因为这种碰撞的结果常使中子运动的方向发生改变。裂变过程产生的动能很高的中子，即快中子，其在反应堆中减速的基本机制是弹性散射。反应堆内那些以其原子核同中子发生弹性散射碰撞的材料叫做慢化剂。最有效的慢化剂是那些质量数低的元素，如水中的氢，重水中的氘，铍和碳（石墨）。中子在每次碰撞时损失的能量随慢化剂的质量数的减小而增大。但是，锂和硼非常强烈地俘获中子，因此不能当慢化剂。

多次散射碰撞的果结，最后使中子的动能减小到大概相当于固体慢化剂内与中子发生碰

撞的核(或原子)的平均振动能量。这个能量的大小依赖于温度。我们称基本上与周围环境处于动能平衡状态的慢化中子为热中子。在原子核研究中一般常用电子伏特 eV ( $1\text{eV} = 1.603 \times 10^{-12}$  尔格) 来表示能量。在室温下, 即约  $20^\circ\text{C}$  或  $70^\circ\text{F}$ , 热中子的平均动能接近于  $0.025\text{eV}$ , 并随绝对温度而线性地增大。中子能量低于  $0.1\text{eV}$  的都称为慢中子, 但其速度仍可达几里/秒<sup>①</sup>。动能等于  $0.1\text{—}50,000\text{eV}$  的中子称为超热中子或中能中子, 而能量超过  $50,000\text{eV}$  的称为快中子。在核反应堆工作中常常采用这种粗略的没有精确规定界限的分类法。

### 1-4-3 非弹性散射

在快中子和原子核之间发生非弹性散射碰撞的过程中, 中子动能的全部和一部转变成靶核的内能(或势能), 结果使原子核处于高能(或激发)态, 而且, 将在极短的时间内, 以  $\gamma$  辐射的形式释放出这些能量。

在弹性碰撞中, 中子和原子核之间的能量交换是一个纯粹的机械过程, 只取决于碰撞质点的相对质量; 但是, 非弹性散射则是一个十分特殊的过程, 例如, 中子的能量就必须足以使靶核上升到一个激发态。这时所需的中子能量对每种原子核类都不一样, 但总的来说, 对于中等质量数或高质量数的原子核, 非弹性碰撞所需的中子能量必须超过  $100000\text{eV}$ , 即  $0.1\text{MeV}$ ; 对于低质量数的原子核, 则甚至要求更高的能量。因此, 虽然非弹性碰撞在反应堆内对于中子的减速也会起一些作用, 但是, 一旦中子能量降低到  $0.1\text{MeV}$ , 它对中子的减速就不再有什么效应了。反之, 在低到热值的整个中子能量范围内, 却都能借弹性碰撞使中子的能量降低下来。

### 1-4-4 中子俘获反应

中子反应的一个重要类型是放射性俘获, 也就是原子核俘获一个中子并随之发出  $\gamma$  辐射。在这种反应中, 中子被反应核(或靶核)俘获后生成了一个处于高能态的复核。在短短若干分之一秒的时间内, 后者以辐射的形式放出多余的能量, 变成一个比靶核多一个中子的原子核。产生的核经常是, 但并非全部是放射性的。并且随后放出负  $\beta$  粒子, 还常常伴随发出  $\gamma$  射线。

放射性俘获是一种非常普遍的过程, 几乎所有的核素都能发生这种类型的反应, 虽然有些比较容易, 有些比较困难。各种能量的中子都能参与放射性俘获, 但一般的规律是, 随中子能量的减小, 中子和原子核之间发生反应的几率增大。换句话说, 各种原子核类俘获慢中子一般都比俘获快中子要来得容易。

在某些具有中等或高质量数的核素上观察到一种有趣的现象: 在一个狭窄的能量范围内, 一般是  $0.1\text{—}100\text{eV}$ , 中子俘获的几率变得非常之大。这个效应称为共振。中子能量低于或高于共振值, 反应几率则陡然下降。在上述能量范围里,  $^{235}\text{U}$  和  $^{238}\text{U}$  都具有几个共振峰。

① 中子的速度用米/秒单位来表示, 等于  $1.4 \times 10^6 \sqrt{E}$ , 这里  $E$  是能量, 用电子伏特来表示。室温下的热中子速度约为  $2200$  米/秒。

### 1-4-5 核 截 面

在指定条件,例如指定中子能量时,发生特定的中子反应的几率可以用截面的数值来表示。这是用实验方法测定的原子核对于某种反应的有效面积。从前面的叙述可以清楚地看到,放射性俘获反应的核截面随中子能量的增大而减小。如果发生共振俘获,对应于共振能量的截面则特别大。

在某些情况下,特别是对高能中子来说,俘获和散射截面与原子核的几何截面积并没有很大的差别。原子核的直径接近于  $10^{-12}\text{cm}$ ,所以截面约为  $10^{-24}\text{cm}^2$ ,因此,为方便起见,我们通常用靶恩作单位来描述中子截面,  $1\text{靶恩} = 10^{-24}\text{cm}^2$ 。

## 1-5 裂 变 过 程

### 1-5-1 核 裂 变

某些高原子序数(和高质量数)的原子核俘获中子时所生成的处于激发态的复核,不通过 $\gamma$ 辐射放出其多余的能量,而是发生裂变,即分裂成两个质量与初始重核非常不同的较轻的核。已经知道只有三种具有很长的半衰期,因此可以贮藏相当长时间的核素: $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ (见表1-1),能够被各种能量(从热值或低于热值到MeV)的中子分裂。它们之中天然存在的只有 $^{235}\text{U}$ 一种,其余两个是从 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{238}\text{U}$ 人工生产出来的,将在第1-5-5节加以叙述。另外还有几种同位素也能被各种能量的中子所裂变,但是,常常因为它们的半衰期非常之短,或者是生产起来非常困难,而没有什么实用价值。

除了那些能够被各种能量中子裂变的核素外,有些核素非要用快中子才能引起裂变。其中要提到的是 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{238}\text{U}$ ,快中子能量低于1MeV,只发生放射性俘获反应,然而高于这个阈能值,将以另一种几率发生某种程度的裂变,但它们不能当作可裂变核素。上面说过,可裂变核素只限于能被各种能量中子裂变的核素。

如同其它核反应一样,裂变几率也可以用截面来表示。裂变截面随中子能量的变化方式与放射性俘获截面类似,甚至也有共振。 $^{235}\text{U}$ 的热中子(0.025eV)裂变截面约为582靶恩,对于能量为1MeV的中子则减小到1.3靶恩,在它们之间还有几个高得多的共振值。 $^{238}\text{U}$ 对于中子能量为1MeV的中子,裂变截面为0.018靶恩,而对于10MeV的中子,则增大到1靶恩<sup>①</sup>。

### 1-5-2 裂 变 中 子

就能量的利用而言,裂变的重要性基于两个事实:第一,随着裂变的发生,单位质量的核燃料释放出巨大的能量;第二,由中子引发的裂变反应,随后又能释放出中子来。正是这两个条件结合起来,才有可能设计成一个核反应堆,其中能进行自持的裂变链式反应,并连续

① 全部截面的数值见参考文献[2]。

释放出能量来。每次裂变释放的中子数目用  $\nu$  来表示，它在一定程度上随引起裂变的中子能量而改变。表 1-2 给出了热中子引起的裂变的  $\nu$  值，快中子裂变值要略高些。平均说来，每次核裂变产生 2.5—3 个中子。

表 1-2 裂变产生的中子数

| 核 素               | $\nu$ ① | $\eta$ ①(热中子) | $\eta$ (快中子) |
|-------------------|---------|---------------|--------------|
| $^{233}\text{U}$  | 2.51    | 2.28          | ~2.4         |
| $^{235}\text{U}$  | 2.47    | 2.07          | ~2.3         |
| $^{239}\text{Pu}$ | 2.90    | 2.10          | ~2.7         |

① 国际公认的数值见参考文献[2]。

从核反应堆设计的观点看，重要的并不是每次裂变释放出多少中子，而是每吸收一个中子会产生多少个裂变中子，后者用  $\eta$  来表示。因为可裂变核素吸收的中子并不都引起裂变，所以  $\eta$  不等于  $\nu$ 。中子吸收不发生裂变而只发生放射俘获的几率是确定的，且随中子能量而

变化。例如， $^{235}\text{U}$  对热中子的放射俘获截面接近于 112 靶恩，裂变截面为 582 靶恩。因此，每次中子吸收只有  $582/(582 + 112) = 0.839$  的几率引起裂变，如上所述  $\eta = \nu \times 0.839 = 2.47 \times 0.839 = 2.07$ 。随着中子能量的升高，放射性俘获的几率变小，所以快中子的  $\eta$  值比热中子大。 $\eta$  的数值列于表 1-2。由于快中子的能量未精确限定，因此表 1-2 中对于快中子的  $\eta$  是近似值。

99% 以上的裂变中子基本上是在裂变过程的瞬间释出的，叫做瞬发中子；很少一部分中子是在一定时间范围内逐渐释出的，叫做缓发中子。裂变中子里缓发中子所占的比例， $^{233}\text{U}$  是 0.26%， $^{235}\text{U}$  是 0.65%， $^{239}\text{Pu}$  是 0.21%。缓发中子是某些裂变产物的放射性蜕变产生的，这些裂变产物的子元素能够释出中子。中子的缓发原因是蜕变率有限，这蜕变率是在 0.17 到 55 秒的范围内，它决定于母元素的半衰期。

倘若没有缓发中子，核反应堆的安全控制即便不是不可能，也会变得极端困难。在反应堆上，只要条件是裂变链需要缓发中子来维持，那末，中子数目（或密度）就会以一个易于控制的速率变化；相反，如果裂变链只是由瞬发中子单独维持，那末，中子密度，因此裂变速率和能量释放，就会增加得如此之快，以致于使反应堆损坏。

裂变中子的动能范围很大，从相当低的数值到 20 MeV 都有。但大多数裂变中子的能量是在 1—3 MeV 之间，因此裂变产生的中子基本上都是快中子。裂变中子能量的加权平均值约等于 2 MeV，每次裂变约产生 2.5—3 个中子，这些中子所带的全部能量约为 6 MeV。

### 1-5-3 裂 变 能

每一个  $^{233}\text{U}$ ， $^{235}\text{U}$  和  $^{239}\text{Pu}$  原子核发生裂变可释放约 200 MeV 的能量。用比较普通的单位来表示，一磅可裂变材料里所含的原子核如果全部发生裂变，将释放约  $3.6 \times 10^{10}$  B.t.u●热量。1400 吨煤或者 300,000 加仑汽油完全燃烧释放的能量相当于这个数值。在这些能量里，约有 86% 在裂变时以动能的形式放出：裂变碎片带 83%，裂变中子带 3%。裂变时发射的  $\gamma$  射线，加上那些在反应堆燃料和其它材料里因中子的放射性俘获所发射的  $\gamma$  射线，约占总能量的 6%。其余 8% 的能量是裂变产物和各种借放射性俘获反应而生成的放射性核在一段时间内以  $\beta$  和  $\gamma$  辐射的形式释放出来的。核反应堆里的全部裂变能量最终都以热能的形式，或者是从燃料元件中，或者是从其它吸收了各种辐射的材料中释放出来。

● B.t.u 是英国热量单位，1 B.t.u = 0.252 千卡。——译者注

因为裂变产物的蜕变能量的释放,以及其它放射性核素达到稳定状态都需要一定的时间,在给定的运转条件下,核反应堆的能量输出最初将逐步地增加,直到达到一个恒值。相应地,当反应堆关闭和链式反应停止之后,蜕变能量仍将继续以热能的形式释放出来。

#### 1-5-4 裂变产物

裂变过程生成的轻核称为裂变碎片。一个具体的原子核类在吸收一个中子后所发生的裂变具有许多不同的方式,结果是生成各种裂变碎片,其数量在从小于总量的 $10^{-5}$ 到超过总量的3%的范围里变化很大。图1-2给出了 $^{235}\text{U}$ 的裂变产额百分数。如上所述,裂变碎片平均都要经历三个负 $\beta$ 蜕变阶段,还常伴有 $\gamma$ 辐射。最终产物的混合物我们一般称为裂变产物,它是一种复杂的多种元素的同位素以不同比例组成的强放射性系统。

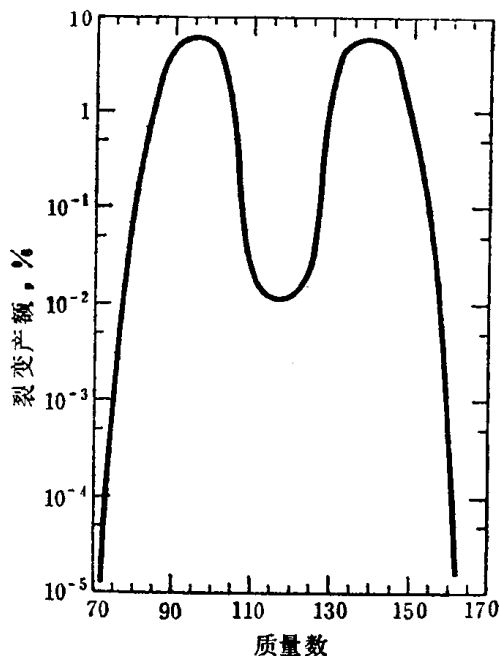


图1-2  $^{235}\text{U}$ 热中子裂变的产额

例如, $^{235}\text{U}$ 被热中子裂变,第一级裂变产物约有80种不同的裂变碎片核,其质量数从72至160。裂变碎片的放射性蜕变结果产生了一种约含有250种放射性的和稳定的同位素的混合物。放置短时间后,在裂变产物里探测出从锌(原子序数30)到钷(原子序数64)的30种不同的元素。这种复杂的混合物长时间发射出各种 $\beta$ 质点和 $\gamma$ 射线,虽然随着放射性核素的蜕变,放射性逐步下降。缓发中子在裂变后也很快释放,但是,它们在几个小时之内就不再有意义了。

#### 1-5-5 裂变材料的生产

天然存在的裂变材料只有 $^{235}\text{U}$ 一种,在普通铀里的含量为0.7%。虽然 $^{238}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 能够被快中子裂变,但它们不能维持链式反应以连续释放能量。其原因是由于裂变中子与 $^{238}\text{U}$ 和 $^{232}\text{Th}$ 核发生非弹性碰撞,能量迅速降到阈值(约1MeV)以下,致使裂变不能进行。然而,假如选择合适的慢化剂使中子减速,则可以用天然铀作反应堆燃料,此时,链式反应在很大程度上由少量的 $^{235}\text{U}$ 的裂变来维持。

许多反应堆的结构要求用 $^{235}\text{U}$ 含量大于0.7%的浓缩铀作燃料。把天然铀先转变成六氟化铀,再进行气体扩散处理即可得到浓缩铀。因为较轻的 $^{235}\text{UF}_6$ 气体扩散透过多孔膜比 $^{238}\text{UF}_6$ 快得多, $^{235}\text{U}$ 就浓缩了一点,反覆地透过一系列的膜,浓缩度可以达到90%以上。随后,可把浓缩的六氟化铀还原成金属或转变成其它适宜于用作反应堆燃料的化合物。

虽然 $^{232}\text{Th}$ 和 $^{238}\text{U}$ 不能直接用来维持反应链,但它们能经过一个简单的核反应系列而相应地转变成裂变原子核 $^{233}\text{U}$ 和 $^{239}\text{Pu}$ 。由于存在这种转换可能性, $^{232}\text{Th}$ 和 $^{238}\text{U}$ 称为再生材料。铀和钍的这种利用法使核裂变能的潜在储量大为扩大。估计钍和铀所蕴藏的能量,当接近于 $10^{21}\text{B.t.u.}$ ,而目前全世界每年消耗的能量约为 $10^{17}\text{B.t.u.}$ 。