



核燃料循环导论

周明胜 姜东君 主 编
戴兴建 徐 旻 副主编



清华大学出版社

核燃料循环导论

周明胜 姜东君 主 编

戴兴建 徐 旻 副主编

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

核燃料进入反应堆前的生产制备及在反应堆中燃烧后的后处理过程统称为核燃料循环。本书全面介绍了反应堆用核燃料循环各个环节的方法和工艺,内容涉及铀资源与铀矿冶、铀纯化转化、铀浓缩、燃料元件制造、反应堆运行及乏燃料后处理等,对核燃料安全也有所涉及。本书按照核燃料生产应用及乏燃料处理流程的先后顺序,对核燃料循环进行了较为系统、全面、有一定深度的阐述,帮助读者对核燃料循环的各个环节的方法、工艺及技术特点有整体的认识。

本书可以作为核燃料循环相关专业的本科和研究生培养的入门教材,由于跟踪了国内外核燃料循环技术的最新进展,也可作为核燃料循环行业科研、生产、运行的工程技术人员的参考书,也可以作为针对核燃料循环学科的科普参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

核燃料循环导论/周明胜,姜东君主编. —北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-45226-3

I. ①核… II. ①周… ②姜… III. ①核燃料—燃料循环—研究 IV. ①TL249

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 264054 号

责任编辑:张占奎
封面设计:常雪影
责任校对:赵丽敏
责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:12.5

字 数:302千字

版 次:2016年12月第1版

印 次:2016年12月第1次印刷

印 数:1~4500

定 价:35.00元

产品编号:063727-01

前言

完整的核燃料循环体系,是一个国家核能和核力量的基础。清华大学拥有完整的核燃料循环与材料二级学科,一直承担着为国家培养高层次核燃料循环专业人才的任务,几十年来,为我国核燃料行业培养和输送了大量人才。

核燃料循环与材料学科的特点是环节多、专业性强,包括铀矿冶、铀纯化转化、铀浓缩、燃料元件制造、反应堆运行、乏燃料后处理等环节,涉及矿冶、铀化学、放射化学、同位素分离、核材料等学科领域,每个环节均有专门的课程和教材。在核燃料专业的教学和人才培养实践中,深感学生缺乏对整个核燃料循环体系的全面认识,往往只对本环节或本环节的某个方面有所了解,对其他环节的知识则相对匮乏。因此在教学实践中,逐步增加了相关内容,但苦于缺少对核燃料循环进行全面介绍的入门教材,因此萌生了在已有讲义的基础上编写《核燃料循环导论》的想法。

经过沟通交流,在中国核燃料有限公司的大力支持下,我们组织编写了本书。作为入门教材,本书力求对核燃料循环各个环节的原理、方法、工艺等进行全面系统的介绍。为使读者容易理解和掌握,本书第2~7章按照核燃料循环的先后顺序进行编排。由于在日本福岛核事故后,各国对核安全的重视程度日益提高,因此增加了第8章,专门对核燃料安全进行了简要介绍。

本书第1、2、4章由姜东君编写,第3、7章由周明胜编写,第5章由戴兴建编写,第6、8章由徐昉编写。在本书的编写过程中,裴根、潘建雄、顾志勇、蹇丛徽、孙启明在制图、统稿、文字校对等方面投入了大量的精力;俞冀阳校对全书,并提出了宝贵意见,在此一并表示感谢!

本书也可作为核燃料循环行业科研、生产、运行的科技人员的参考书。

由于作者水平所限,书中难免存在问题和不足,欢迎读者批评指正。希望本书的出版为我国核燃料人才培养、核燃料专业知识的科普起到积极的推动作用。

编著者

2016年5月

目录

第 1 章 概述	1
1.1 核燃料分类	1
1.2 核燃料资源	3
1.3 裂变材料的丰度与铀浓缩	3
1.3.1 裂变材料的丰度与临界质量和临界体积	3
1.3.2 铀浓缩	5
1.4 核燃料循环	5
参考文献	7
第 2 章 铀资源与铀矿冶	8
2.1 铀矿资源	8
2.1.1 铀矿分布特点	8
2.1.2 铀矿石分类	9
2.1.3 世界铀矿资源分布	10
2.1.4 中国的铀资源	10
2.2 铀的常规开采技术	11
2.2.1 铀矿床开拓	11
2.2.2 铀矿地下开采方法	13
2.2.3 放射性物探	17
2.3 铀矿石破碎	18
2.3.1 破碎理论	18
2.3.2 破碎设备	19
2.3.3 破碎流程	19
2.3.4 磨矿	19
2.4 铀的浸出方法	20
2.4.1 酸法	20
2.4.2 碱法(碳酸盐法)	22
2.5 铀的提取方法	24
2.5.1 矿浆的固液分离和洗涤	24

2.5.2	离子交换法提铀工艺	24
2.5.3	萃取法提铀工艺	28
2.6	新型采矿技术——溶浸采铀方法概述	34
2.7	沉淀法和铀产品制备	36
2.7.1	从酸性溶液中沉淀铀	38
2.7.2	从碱性溶液中沉淀铀	38
	参考文献	39
第3章	铀的化学转化	41
3.1	概述	41
3.2	铀的纯化	42
3.3	铀氧化物的制备	42
3.3.1	铀氧化物的物理化学性质	42
3.3.2	铀氧化物的生产	44
3.3.3	UF ₆ 转化为UO ₂	45
3.4	四氟化铀制备	48
3.4.1	UF ₄ 的物理化学性质	48
3.4.2	UF ₄ 的制备	50
3.4.3	UF ₆ 转化为UF ₄	50
3.5	六氟化铀制备	54
3.5.1	UF ₆ 的物理化学性质	54
3.5.2	UF ₆ 的制备	57
3.6	目前国内外铀转化现状	60
3.6.1	铀转化工艺发展情况	60
3.6.2	国内外相关情况	60
	参考文献	62
第4章	铀浓缩	63
4.1	铀浓缩的意义	63
4.2	气体扩散法	63
4.2.1	气体扩散法的历史	63
4.2.2	气体扩散法的分离原理	64
4.2.3	二元气体混合物通过单层分离膜的流动和分离	65
4.2.4	浓缩铀的气体扩散技术	66
4.3	气体离心法	68
4.3.1	气体离心法的发展历史和现状	68
4.3.2	气体离心法的基本原理	71
4.3.3	逆流离心机的倍增效应	76
4.3.4	逆流离心机的环流驱动方式	78

4.3.5	逆流离心机的主要结构元件	79
4.3.6	气体离心法的理论基础	81
4.3.7	离心级联	87
4.4	激光同位素分离	91
4.4.1	激光分离同位素的历史	91
4.4.2	激光分离同位素的主要方法	91
4.4.3	原子蒸气激光法分离系统	92
4.4.4	分子法激光分离同位素	94
4.5	世界铀浓缩发展情况	96
	参考文献	96
第5章	反应堆用核燃料及组件制造	97
5.1	金属核燃料	98
5.1.1	金属铀	98
5.1.2	金属钷	103
5.1.3	金属钍	106
5.2	陶瓷核燃料	108
5.2.1	含铀陶瓷	108
5.2.2	含钷陶瓷	111
5.2.3	含钍陶瓷	112
5.3	核燃料在反应堆中的应用	112
5.3.1	压水堆	112
5.3.2	沸水堆	113
5.3.3	重水堆	114
5.3.4	其他堆型	114
5.4	压水堆燃料组件制造	117
5.4.1	UO ₂ 粉末制备	118
5.4.2	UO ₂ 芯块制备	119
5.4.3	核燃料组件组装	120
5.4.4	核燃料组件检测	123
	参考文献	126
第6章	反应堆运行	127
6.1	反应堆物理	128
6.1.1	核裂变及裂变产物	128
6.1.2	链式反应、中子循环、慢化剂	130
6.1.3	反应堆临界	133
6.1.4	反应性的变化与控制	134
6.1.5	堆内的热量传递	136

6.1.6	核燃料管理	137
6.2	反应堆的分类及常见堆型燃料特点	140
6.2.1	压水堆燃料	141
6.2.2	沸水堆燃料	141
6.2.3	重水堆燃料	142
6.2.4	高温气冷堆燃料	143
6.2.5	快堆燃料	143
	参考文献	145
第7章	乏燃料贮存及后处理	146
7.1	概述	146
7.1.1	乏燃料与乏燃料后处理	146
7.1.2	核燃料后处理在核工业中的重要性	146
7.1.3	乏燃料后处理工艺发展概况	148
7.1.4	国外乏燃料后处理设施的建设发展概况	151
7.2	乏燃料元件的运输和贮存	154
7.3	乏燃料元件的首端处理	156
7.3.1	乏燃料元件的脱壳方法	156
7.3.2	乏燃料元件芯体的化学溶解	157
7.3.3	铀钚共萃取料液的制备	159
7.4	乏燃料后处理的铀钚分离过程	160
7.4.1	共去污分离循环	161
7.4.2	钚的净化循环	163
7.4.3	铀的净化循环	164
7.5	尾端处理过程	164
7.5.1	钚的尾端处理过程	165
7.5.2	铀尾端处理过程	167
7.6	高放废液的处理与处置	169
7.6.1	浓缩	169
7.6.2	贮存	170
7.6.3	固化	170
7.6.4	高放废物的处置	172
	参考文献	174
第8章	核燃料安全	176
8.1	核燃料的危害与安全	176
8.1.1	核燃料的化学毒性及防护	176
8.1.2	核燃料的辐射危害与防护	178
8.1.3	裂变核燃料的临界安全	181

8.1.4 火灾预防	183
8.2 核安全监管	183
8.2.1 核安全监管组织机构	184
8.2.2 我国核与辐射安全法规状态	184
8.2.3 核安全监管主要内容	185
8.2.4 核燃料循环设施的分类和基本安全要求	185
8.3 核燃料应急与放射性废物处置	186
8.3.1 核燃料应急	186
8.3.2 放射性废物处置	187
参考文献	189

核燃料的发现已经有一百多年的历史了。1789 年德国化学家克拉普洛特从德捷边境的伊特必村的阿姆斯特矿中发现了沥青铀矿,并分离出棕黑色的二氧化铀粉末。1841 年法国化学家佩里戈特用钾还原四氧化铀得到金属铀。为了纪念天文学家盖尔舍勒于 1781 年发现的天王星(Uranus),将这种新元素命名为“铀”(Uranium)。

1892 年法国科学家贝克勒尔首次发现放射现象,即铀能够使底片感光。1905 年,爱因斯坦提出质能方程,将质量和能量用光速联系在一起,解释了质能关系。1938 年,德国物理化学家奥托·哈恩与弗里·斯特拉斯曼用慢中子轰击铀原子核,发现了铀原子核分裂并释放出很高的能量,这就是核裂变反应,核裂变释放的能量即为核能(也称为原子能)。

1942 年,美国科学家费米在芝加哥大学建成第一座可控原子核裂变链式反应堆,使其达到临界状态。该反应堆具备两个基本特点:①自持性;②可控性。截至 2015 年,世界上共有 439 台运行的核电机组,装机容量 382.547TW;在建机组 66 台,装机容量为 70.335TW。目前核电在世界电力供应中约占 11.5%。

在当今世界的能源中,核能具有重要的地位,是我国未来能源发展的方向。核燃料是核能之源,是核武器制造、核能利用的基本原料,是核工业的基础和核心。建立完整的核燃料循环体系,是一个国家发展核能和核力量的基础。

完整的核燃料循环体系包括为反应堆供应燃料和其后的所有处理和处置过程,包括铀的采矿、加工提纯、化学转化、铀浓缩、燃料元件制造、元件在反应堆中使用、乏燃料后处理、废物处理和处置等,涉及铀矿冶、核化工、同位素分离、粉末冶金、机械加工、核反应、放射化学等诸多学科和领域。

本书主要针对铀裂变和相关的核燃料及其循环体系以及各个环节的原理和相关工艺技术进行介绍,力图使读者对核燃料循环有整体的认识,为将来从事核燃料相关工作打下基础。

1.1 核燃料分类

可以通过核反应(裂变或聚变)释放出巨大能量的核素主要有 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U 和 ^2H (氘,D)、 ^3H (氚,T)、 ^6Li 。这些核素是反应堆的能量来源,也是核武器的能量来源。在核能领域,这些核素或含有这些核素的材料通称为核燃料。按照释放能量方式的不同,可将核反应分为裂变核燃料和聚变核燃料。

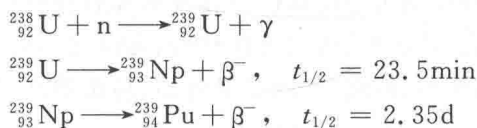
^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U 三种核素通过核裂变反应释放能量,所以这三种核素和含有这三种核素的材料称为裂变核燃料。这些核素的原子核受到中子的轰击时会分裂成两个或多个碎片核,放出 $200\text{MeV}^{\text{①}}$ 的能量的同时释放出 $2\sim 3$ 个中子。释放出的中子又去轰击其他原子核,引发更多的核裂变,并释放出更多的中子,这种自持进行的连续核裂变反应称为“链式核裂变反应”,简称“链式反应”。在一定的条件下,在堆积的或布置的核燃料中这一裂变过程会自持地连续进行下去。像 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U 这样能够俘获不同能量的中子发生裂变并能维持链式反应的核素,称为“易裂变核素”,迄今发现的可大规模工业利用的只有这 3 种核素。

在核武器中,不对易裂变核素的链式反应进行控制,链式反应一旦发生,便迅速蔓延,在千万分之一秒的瞬间释放出巨大能量,形成强烈爆炸。在反应堆中,链式反应受到控制,使链式反应平稳地进行,缓慢地释放能量,供人类使用。

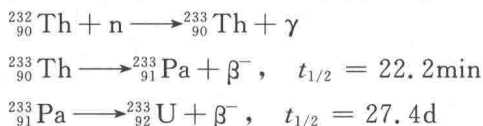
一个 ^{235}U 原子核裂变释放出的可利用能量约为 200MeV , 1kg 的 ^{235}U 全部发生核裂变,释放出的能量约为 $8.2\times 10^{10}\text{kJ}$,相当于 2000t 石油或 2500t 标准煤完全燃烧产生的能量,也就是说, 1kg 的 ^{235}U 放出能量分别是 1kg 石油或煤完全燃烧产生的能量的 200 万倍和 250 万倍。

^2H 、 ^3H 、 ^6Li 三种核素可以通过核聚变反应释放能量,所以这些核素被称为“聚变核燃料”。核聚变反应在几百万甚至上千万摄氏度高温下才能进行。在这种温度下,这些核素的原子核动能可达到几千电子伏到几万电子伏,足以克服原子核之间的库仑排斥力,相互碰撞而聚合为一个较重的核。所以核聚变反应又称为热核反应,这些核素又称作“热核燃料”或“热核材料”。由于聚变反应所需的温度条件极其苛刻,所以要实现可控的聚变反应并释放出可供利用的能量极为困难。目前聚变堆仍处于研究和实验阶段。

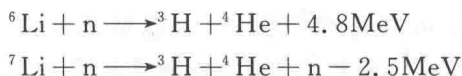
三种易裂变核素中,只有 ^{235}U 在自然界中天然存在, ^{239}Pu 和 ^{233}U 在自然界中不存在,需要用中子辐照 ^{238}U 和 ^{232}Th 进行核转变得得到。因此,可以把 ^{235}U 称为初级核燃料或一次核燃料,把 ^{239}Pu 和 ^{233}U 称为次级核燃料或二次核燃料。 ^{238}U 受到中子轰击后,先吸收一个中子转变为 ^{239}U ,再经过两次 β 衰变转变为 ^{239}Pu ,其核反应式为



^{232}Th 的核转变与 ^{238}U 相类似,也是先吸收一个中子转变为 ^{233}Th ,再经两次 β 衰变转化为 ^{233}U :



聚变核燃料中,核素 ^3H 在自然界不存在,需要用 ^6Li 和 ^7Li 在中子辐照下进行转换得到。其核反应式为



^① $1\text{eV} \approx 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ 。

^{238}U 、 ^{232}Th 和 ^6Li 、 ^7Li 这些能在中子辐照下转换为 ^{239}Pu 、 ^{233}U 和 ^3H 的核素称为可转换核素。这些核素和含有这些核素的材料称为“再生燃料”“再生材料”“转换材料”。

在核燃料生产中,将再生材料置于核反应堆(裂变反应堆或聚变反应堆)中,在核反应产生的中子辐照下转换成作为核燃料的核素。当转换比大于 1 时,新生的核燃料多于消耗的核燃料,这样的核转换称为燃料增殖,可转换核素和含有可转换核素的材料又称为增殖材料。 ^{238}U 、 ^{232}Th 为裂变增殖材料, ^6Li 、 ^7Li 为聚变增殖材料。

在本书中,对聚变核燃料和增殖材料不做阐述,只针对初级裂变核燃料循环进行介绍,因此,如果不做特殊说明,后面提到的“核燃料”均指含有易裂变核素 ^{235}U 的初级裂变核材料。

1.2 核燃料资源

自然界存在的易裂变核素只有 ^{235}U ,它与可转换核素 ^{238}U 以天然铀混合物的形式存在。天然铀含有三种同位素,除 ^{235}U 和 ^{238}U 外,还有 ^{238}U 的衰变产物 ^{234}U 。三种同位素在铀中的百分含量即相对丰度见表 1.2.1。从表中可以看出,天然铀中主要的同位素为 ^{238}U , ^{235}U 丰度很低。

表 1.2.1 铀的天然同位素及其丰度

同位素	丰度/%
^{234}U	0.0054
^{235}U	0.7204
^{238}U	99.2742

1.3 裂变材料的丰度与铀浓缩

1.3.1 裂变材料的丰度与临界质量和临界体积

易裂变核素的链式裂变反应并非在任何情况下都能发生。欲使链式反应发生并自持地进行下去,必须使每一次核裂变释放出的中子中,平均至少有一个能够再引起一次核裂变,也就是要使燃料中的中子增殖系数 $K \geq 1$ 。当核燃料的数量很少时,燃料的体积太小,即使发生了核裂变,释放出的绝大多数中子也都飞出燃料的体积之外,不能击中其他原子核引发新的裂变,链式反应也就不会发生。当在一定体积内堆积或布置的燃料增加到足够数量时,链式反应才能发生并自持地进行下去。

在一定条件下(例如在反应堆中燃料与慢化剂按一定方式布置),能够发生并维持链式反应的燃料的最低数量,称为燃料的“临界质量”,包容燃料的相应体积称为“临界体积”。

影响临界质量和临界体积的因素有多种。

首先是中子泄漏。燃料的体积总是有限的,总要有一部分中子从体积表面上泄漏飞逸,而不参加核裂变反应。中子泄漏损失的比例取决于燃料表面面积与体积之比,增加燃料的体积(或质量),可以减小表面积与体积之比,使中子泄漏率减小,当中子的泄漏率小到恰使中子增殖系数 $K = 1$ 时的体积便是临界体积。临界体积的大小还和体积的形状有关,体积一定时,球形的表面积最小,亦即表面积与体积之比最小,中子泄漏率最小。如果再用中子

反射层把燃料系统包围起来,把泄漏的中子再反射回燃料体积之内,临界质量和临界体积会更小。核武器中和反应堆的堆芯外围都设有中子反射层。

其次是铀燃料中 ^{238}U 对中子的吸收。天然铀中, ^{238}U 占99.3%,而 ^{235}U 仅占0.72%, ^{235}U 放出的裂变中子遇到的主要是 ^{238}U 。裂变中子是快中子,对 ^{238}U 的裂变截面极小,与 ^{238}U 的作用主要是非弹性散射,在散射过程中能量逐渐降低,当能量降低到小于1.1MeV, ^{238}U 开始对中子发生俘获反应,当能量再降低到几十个电子伏时, ^{238}U 对中子出现俘获共振,大量中子被 ^{238}U 俘获吸收,而不能与 ^{235}U 发生反应。对此,可采取两项措施:一是减少 ^{238}U 的含量,也就是提高 ^{235}U 的富集度;二是预先将快中子慢化为热中子($E=0.025\text{eV}$),避开 ^{238}U 的俘获共振峰。而且热中子对 ^{235}U 的裂变截面特别大, $\sigma_f=582\text{b}$,而俘获截面 σ_c 却很小。这样就可以减小临界质量和临界体积。快中子反应堆采用第一项措施,使用高浓铀或高浓钚燃料,核武器也采用第一项措施,使用纯的 ^{235}U 或 ^{239}Pu 。热中子反应堆则两项措施都采用,既使用浓缩铀,又使用慢化剂。

再次是燃料中的杂质元素和反应堆内各种材料对中子的吸收。特别是一些中子俘获截面大的杂质元素,如B、Cd、Li、Hf以及稀土元素,能大量吸收中子。在核燃料加工和燃料元件材料、堆芯材料的加工中,要尽量把这类元素清除掉,使燃料和元件材料、堆芯材料达到“核纯”,使中子的寄生俘获减到最小。

另外,易裂变核素在燃料材料中的含量、慢化剂的性质和数量、燃料与慢化剂的布置方式、反射层的效率等,都对临界质量和临界体积的大小有影响。三种核燃料 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U 在同样条件下的临界质量也不相同, ^{235}U 的快中子裂变截面比其他两种核素都小,所以纯的 ^{235}U 的临界质量最大。不同条件下不同含量的燃料的临界质量,可以小到1kg、几百克,也可以大到几百千克,甚至几十吨。例如用天然铀燃料,石墨作为慢化剂,临界质量可多达200kg(^{235}U),燃料总质量超过30t。表1.3.1和表1.3.2列举了几种条件下的临界质量。

表 1.3.1 三种纯核燃料的临界质量

燃料种类	^{235}U	^{239}Pu	^{233}U
水溶液态临界质量/kg	0.820	0.510	0.59
金属体临界质量/kg	22.8	5.6	7.5

表 1.3.2 不同富集度铀燃料临界质量(球形体积,设天然铀反射层)

反射层厚度/cm	15						
	富集度/%	100	80	60	40	20	10
临界质量/kg		15	21	37	75	250	1300

考虑到在反应堆运行过程中,核燃料不断消耗减少,以及其他问题,核燃料的初始装载量要大于临界质量。对于过量核燃料引起的过剩反应性,通常采用控制棒来补偿(抵消)。随着燃料的消耗,逐步将控制棒取出。还可在堆芯中加入“可燃毒物”,在反应堆运行初期对过剩反应性进行抑制,借助于中子俘获,随着燃料的加深,“可燃毒物”的“毒性”以所需的平衡速度逐步消耗。

对临界质量需要指出的另一个问题是,当核燃料的数量达到或超过临界质量时,链式反应会自发地发生,并自持地进行下去,不需要人为地引入中子引发第一代核裂变。引发初始

核裂变的中子,一是来自于易裂变核素的自发核裂变,二是宇宙射线中的高能带电粒子和中子。

1.3.2 铀浓缩

在反应堆中,裂变核燃料可以直接使用天然铀。使用浓缩铀作为燃料的优势在于,可以提高燃料中易裂变核素的含量,增加燃耗深度,降低核燃料的临界体积和临界质量,从而减小堆芯活性区体积,使堆芯紧凑;同时,可减少燃料元件制造、储运量,减少乏燃料的后处理量。因此,大多数采用 ^{235}U 含量高于天然丰度的低浓缩铀。

世界上早期建立的反应堆都用天然铀作为燃料。钚生产堆一般用天然铀(或稍加浓缩)作为燃料,动力堆中少数石墨气冷堆及少数重水堆(如加拿大的 CANDU 堆)用天然铀燃料,个别研究堆也有用天然铀的,例如加拿大的 NRX 堆。使用天然铀燃料,除对没有同位素分离厂的国家比较方便外,主要是可以独立于庞大的同位素分离生产系统获取核燃料 ^{239}Pu 。

动力堆一般使用富集度为 $1\%\sim 5\%$ 的低浓铀作为燃料。研究堆、试验堆都采用浓缩铀作为燃料,但 ^{235}U 丰度的差别很大,从 2% 、 3% 到 10% 、 20% 再到 90% 不等,高通量堆过去都采用 ^{235}U 丰度为 90% 的高浓铀燃料,20世纪90年代后采用丰度为 20% 中浓铀燃料。快中子堆采用高浓铀或高浓钚作为燃料,因为快中子对易裂变核素的裂变截面小,为达临界需使用高浓燃料。 ^{235}U 丰度在 90% 以上的高浓铀和高浓钚也是核武器的装料。

天然铀中 ^{235}U 的含量只有 0.72% 。在核工业核燃料生产中,需采用同位素分离的方法提高 ^{235}U 的丰度。根据不同的需要, ^{235}U 的最高含量可达到 93.5% 。这一分离过程称为铀浓缩,浓缩后的铀称为浓缩铀。一般来说, ^{235}U 丰度小于 5% 的称为低浓铀, ^{235}U 丰度高于 80% 的称为高浓铀。经同位素分离后,贫料中的 ^{235}U 丰度降低到 0.3% 或 0.25% ,称为贫铀。

贫铀可用做快中子增殖堆的增殖材料或中子反射层,也是核武器中子反射层材料,还可做放射性物料的屏蔽容器。

1.4 核燃料循环

核燃料循环是指核燃料进入反应堆前的制备和在反应堆中燃烧后处理的整个过程,包括铀矿冶、铀转化、铀浓缩、燃料元件制造、燃料元件的堆内燃烧释放能量、乏燃料的贮存和后处理等过程(图 1.4.1)。

核燃料循环模式分为两种:一次通过的开路循环模式和闭式循环模式。一次通过模式不对乏燃料进行后处理,而是在暂存后直接进行永久处置。闭式循环模式则对乏燃料进行回收处理,再对剩余的强放射性废物进行最后处置,完成整个循环过程。

(1) 铀矿的采冶

传统方法开采的铀矿石经过破碎或进行初选后,用酸或碱浸取,然后用离子交换或溶剂萃取获得铀的化学浓缩物。中间产品的主要成分是重铀酸铵,含 $40\%\sim 70\%$ 的铀。现在采

要介绍核燃料元件在反应堆中的运行,第 7 章为乏燃料后处理工艺及相关技术的介绍,核燃料安全是当前核工业发展的前提和重要保证,相关知识在第 8 章中进行系统介绍。

参考文献

- [1] World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements[EB/OL]. <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-archive/reactor-archive-january-2016.aspx>.

作为唯一的天然裂变元素,铀元素在自然界分布广泛,但易于开采的铀矿石品位一般较低。核燃料对铀纯度的要求很高(金属铀的纯度要求大于 99.9%),与普通金属相比,铀的提取过程比较复杂,要先把矿石加工成含铀 60%~70%的化学浓缩物(重铀酸铵,呈黄色,俗称黄饼),再进一步加工精制。

本章主要介绍铀矿资源和铀的化学浓缩物的制备过程,包括铀矿开采、铀的酸法和碱法浸出、提取和沉淀过程,如图 2.0.1 所示。

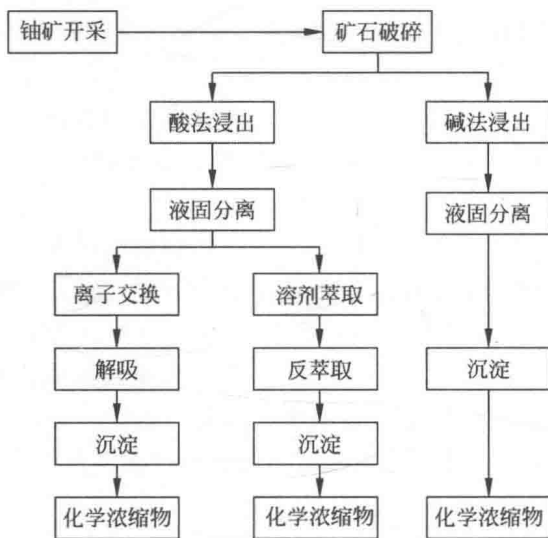


图 2.0.1 铀的化学浓缩物的制备过程

2.1 铀矿资源

2.1.1 铀矿分布特点

铀元素在自然界分布相当广泛,在地壳内和海水中均有存在,但储量并不丰富。地壳中铀的平均含量约为 2.5×10^{-6} ,即平均每吨地壳物质中约含 2.5g 铀,高于金、银、钨、汞等元素。在海水中,平均每吨海水含铀 3.3mg。