



先进核电技术与核安全系列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

# 最新核燃料循环

The Newest Nuclear  
Fuel Cycle

韦悦周 吴艳 李辉波 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



先 进 核 电 技 术 与 核 安 全 系 列

“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

# 最新核燃料循环

The Newest Nuclear Fuel Cycle

韦悦周 吴艳 李辉波 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书为“十二五”国家重点图书出版规划项目“核能与核技术出版工程”之一。主要内容包括国内外最新核燃料循环体系的概况,铀矿的勘探、开采和分离提取,并阐述了铀浓缩(同位素分离)的基本原理和主要技术;核燃料元件的基本结构和设计,轻水反应堆、快中子堆、高温气冷堆的燃料制造加工工艺、安全管理以及发展趋势;乏燃料的输送方法及安全对策、湿法储存方式及干法储存方式的主要设施设备以及各国乏燃料储存的状况;乏燃料后处理的概要、工艺流程及主要机器设备的构成,工艺安全性及保障措施,世界后处理工厂的概况;放射性废物的来源及分类,高、中、低放射性废物及放射性气体的管理及处理技术;世界各国在先进后处理分离技术领域的研发状况及展望。

本书可为有关专业人士的科研工作提供最新参考,亦可作为高等院校核工程专业、核化工专业及核燃料工程专业的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

最新核燃料循环 / 韦悦周, 吴艳, 李辉波编著.

—上海: 上海交通大学出版社, 2016

(核能与核技术出版工程)

ISBN 978-7-313-14030-2

I. ①最… II. ①韦… ②吴… ③李… 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(2015)第 259636 号

## 最新核燃料循环

编 著: 韦悦周 吴 艳 李辉波

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 479 千字

版 次: 2016 年 3 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-14030-2/TL

定 价: 148.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 28.75

印 次: 2016 年 3 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

# 丛书编委会

## 总主编

杨福家(复旦大学原校长,中国科学院院士)

## 编委(按姓氏笔画排序)

于俊崇(中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

马栩泉(清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中(清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

申森(上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英(复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙扬(上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭(中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青(中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠(中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆(中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉(上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新(上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光(上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂(中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡立生(上海交通大学电子信息与电气工程学院,教授)

胡思得(中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐步进(浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰(中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄钢(上海健康医学院院长,教授)

曹学武(上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程旭(上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生(上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

# 总 序

1896年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了70多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资25亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约74%,排名第一,中国仅约2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至2015年6月底,中国投入商业运行的核电机组共25台,总装机容量为2334万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是21世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在21世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

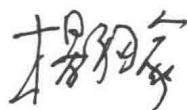
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015年11月

# 前 言

近年来,随着全球人口的持续增长和世界经济的快速发展,人类面临着能源紧缺、气候变暖和环境污染三大全球性挑战。化石燃料的开发和利用是导致地球温暖化和环境污染的重要原因之一,而且化石燃料在地球上的储量有限,属于不可再生资源,无法持续地满足人类社会发展的需求。核能作为一种高效、清洁、经济的能源,在满足人类能源长期需求以及应对环境温室效应方面起着重要的双重作用。核电是指利用核裂变或者核聚变释放出来的巨大能量进行发电,目前核电站都是利用核裂变能。核电是一种清洁能源,利用过程中几乎不产生二氧化碳和污染性气体,近 30 年来,核电的发展为缓解能源短缺、全球变暖和环境污染起到了至关重要的作用。根据国际能源机构(IAEA)的统计数据,2012 年全球能源的 5.7%和全球总发电量的 13%来自裂变式核电站。另据 2014 年 3 月 IAEA 发布的统计结果显示,2013 年年底全世界运行的反应堆共 437 个,在建反应堆 72 个,属 1989 年以来最多。这说明全球核电逐渐走出了福岛核事故的阴影,重新步入稳步发展的新时代。近年来我国核电发展迅速,截至 2014 年年底我国大陆运行核电机组 22 台,总装机容量达到 2 030 万千瓦,核能发电占全国发电总量的 2.1%。在建机组 29 个,约占全球在建机组的 40%。并且按照核电中长期发展规划,我国的核电事业今后 20 年仍将处于高速发展阶段。

随着核电反应堆的大量运行,核电站产生的乏燃料累积量也不断增加,到 2014 年为止全球动力堆产生的乏燃料累积量达到 37 万吨,每年新产生的乏燃料约为 1.2 万吨。通常的轻水堆乏燃料含有约 95% 的铀、1% 的钚及 4% 左右



的裂变产物元素。一方面,由于目前的反应堆技术对核燃料中的铀利用率较低,乏燃料中仍有含量可观的铀和钚可以回收再利用。另一方面,乏燃料中含有裂变产物,其放射性对环境有很大的威胁。因此,合理处理乏燃料是核电可持续发展的前提和基础,提高铀资源的利用率和尽量减少核废物的危害是核电可持续发展的前提和保障。核燃料的循环利用是有效解决这两个问题的根本途径。

随着核电的快速发展和已探明铀资源的相对短缺使得乏燃料处理受到了越来越多的重视。各国对乏燃料处理有不同的政策,目前动力堆燃料循环方式主要有两种思路:一种是“一次通过”的开路循环模式,另一种是进行后处理的闭式循环模式。“一次通过”的开路循环模式是指对乏燃料不进行后处理而直接进行地质处置,该方法相对简单,在铀价较低的情况下也较为经济,亦有利于防核扩散。核电发展初期大多数国家倾向于选择此方案。但后来发现该方法不仅浪费了大量的铀资源,而且存在很多安全和环境问题,不符合核能可持续发展战略。后处理的闭式循环模式是对乏燃料进行化学分离处理(后处理),回收其中的铀和钚,加工成新的核燃料反复利用,只将剩下的占乏燃料重量约4%的裂变产物进行固化和地质处置。因此,闭式核燃料循环一方面能够大大地提高铀资源的利用率,实现铀资源的保障供给;另一方面,显著地减少了放射性废物的产生量,降低其对人类健康和环境的潜在危害。近年来,越来越多的国家选择采用闭式循环模式处理乏燃料。

总的来说,人类对能源的需求将持续增长,核电是解决能源短缺问题的根本出路之一,提高铀资源的利用率,减少放射性废物对环境的危害是核电可持续发展的保证,因此闭式核燃料循环是核能发展的必然选择。核燃料循环是核能系统的“大动脉”,包括铀矿的勘探开采、冶炼提纯、铀浓缩(铀同位素分离)、燃料元件制造、乏燃料的贮存和管理、乏燃料后处理、放射性废物的处理处置等环节,乏燃料后处理是核燃料循环链中最关键的步骤,其目的是将乏燃料中的铀和钚以及裂变产物相互分离,使得铀和钚作为燃料再利用,同时减少放射性废物的产生量。

本书试图较全面和系统地介绍国内外最新核燃料循环体系的概况、相关

的各个技术环节、科学管理、尚存问题及前沿研究。知识面覆盖了核化工、放射化学、核材料、辐射防护等多个领域。第 1 章介绍核燃料循环的意义、构成及各国的政策;第 2 章到第 7 章,分别介绍铀资源提取及铀浓缩、核燃料制造、乏燃料管理、乏燃料后处理、放射性废物管理及处理。第 8 章介绍国内外先进核燃料循环研究的进展,希望起到抛砖引玉的作用。

本书出版的主要目的是为有关专业人士的科研工作提供最新的参考,亦可作为高等院校核工程专业、核化工专业及核燃料工程专业的参考书籍,同时希望能为我国普及核燃料循环知识和促进对核能的理解提供参考材料。

由于作者学识所限,加上成书时间仓促,书中存在的缺点与不足,敬请读者批评指正。

# 目 录

1 核能发电与核燃料循环概述 .....	001
1.1 核能的来源 .....	001
1.2 核电反应堆概述 .....	006
1.3 世界核电发展概况 .....	010
1.4 核燃料循环的意义 .....	014
1.5 核燃料循环的基本过程 .....	018
1.6 各国核燃料循环路线的选择 .....	023
参考文献 .....	026
2 铀资源提取及铀浓缩 .....	027
2.1 世界铀矿资源 .....	027
2.1.1 概论 .....	027
2.1.2 铀资源的分类和分布 .....	029
2.1.3 铀的矿物与矿床 .....	030
2.1.4 铀矿的生产 .....	035
2.1.5 铀的供需 .....	037
2.2 铀矿的勘探、开采、冶炼 .....	039
2.2.1 铀矿的地质勘探 .....	039
2.2.2 铀矿石开采 .....	039
2.2.3 铀的冶炼 .....	042
2.3 铀的转化 .....	048

2.3.1	铀的转化工序 .....	048
2.3.2	世界各国的铀转化技术 .....	051
2.3.3	后处理回收铀的转换 .....	056
2.4	铀的浓缩 .....	058
2.4.1	概论 .....	058
2.4.2	铀浓缩的方法 .....	060
2.4.3	世界铀浓缩工厂 .....	065
	参考文献 .....	069
<b>3</b>	<b>核燃料制造 .....</b>	<b>071</b>
3.1	核燃料元件的基本结构 .....	072
3.1.1	对燃料元件的要求 .....	072
3.1.2	燃料元件的基本结构 .....	075
3.1.3	核燃料物态的选择 .....	079
3.1.4	包壳材料的选择 .....	081
3.1.5	燃料元件的质量保证和质量控制 .....	082
3.2	轻水反应堆燃料 .....	083
3.2.1	轻水堆燃料的制造 .....	083
3.2.2	MOX 燃料的制造 .....	087
3.3	快中子堆燃料 .....	089
3.3.1	快堆用 MOX 燃料的特征 .....	090
3.3.2	快堆用 MOX 燃料的制造 .....	091
3.3.3	MOX 燃料制造工序的安全管理 .....	094
3.3.4	快堆 MOX 燃料制造技术的展望 .....	095
3.4	高温气冷堆燃料 .....	096
3.4.1	高温气冷堆燃料的特征 .....	096
3.4.2	高温气冷堆燃料的制造 .....	097
3.4.3	高温气冷堆技术开发的展望 .....	098
	参考文献 .....	098

4 乏燃料的性状及管理 .....	099
4.1 乏燃料的组成及性质 .....	099
4.1.1 核裂变产物的放射能 .....	099
4.1.2 锕系核素的放射能 .....	113
4.1.3 燃料循环方式对乏燃料性质的影响 .....	121
4.2 乏燃料运输 .....	126
4.3 接收乏燃料 .....	137
4.4 乏燃料的贮存 .....	142
4.4.1 湿法贮存 .....	145
4.4.2 干法贮存 .....	151
4.4.3 乏燃料贮存技术比较 .....	157
4.4.4 世界各国的贮存现状 .....	158
4.4.5 贮存工艺设计原则和技术措施 .....	163
4.4.6 乏燃料贮存的长期健全性 .....	165
4.5 乏燃料运输和贮存过程中的事故、事件与经验教训 .....	166
参考文献 .....	169
5 乏燃料后处理技术发展状况 .....	171
5.1 后处理的重要性 .....	171
5.2 后处理工艺的主要特征 .....	177
5.3 后处理的历史回顾 .....	179
5.4 后处理分离技术 .....	181
5.4.1 磷酸铋沉淀法 .....	181
5.4.2 溶剂萃取法 .....	183
5.4.3 分离技术的变迁与发展 .....	188
5.5 世界后处理工厂概况 .....	191
5.6 主要核能国家后处理工业及发展概况 .....	195
5.6.1 美国 .....	195
5.6.2 法国 .....	197

5.6.3	英国	199
5.6.4	欧洲其他国家	201
5.6.5	日本	202
5.6.6	俄罗斯	203
5.6.7	印度	205
5.6.8	中国	207
5.7	日本后处理技术的经验及教训	207
5.7.1	概述	207
5.7.2	日本相关后处理主要设施	209
5.7.3	委托海外后处理	213
5.7.4	六所村后处理工厂的设计	213
5.7.5	六所村后处理工厂的试验运行	216
5.7.6	六所村后处理工厂的主要故障及对策	217
	参考文献	222
6	PUREX 后处理工艺技术	225
6.1	PUREX 流程的基本构成	225
6.2	乏燃料组件的首端处理	227
6.2.1	乏燃料组件的冷却	227
6.2.2	乏燃料组件的切断	229
6.2.3	乏燃料的溶解	234
6.2.4	溶解液的调制	241
6.3	溶剂萃取分离	244
6.3.1	溶剂萃取的基础知识	244
6.3.2	TBP 萃取分离的基本原理	254
6.3.3	铀和钚共去污	264
6.3.4	铀/钚分离	269
6.3.5	铀净化循环及铀尾端	276
6.3.6	钚净化循环及钚尾端	280

6.3.7	污溶剂洗涤与溶剂复用 .....	288
6.3.8	萃取分离器 .....	292
6.4	后处理工艺安全及核保障措施 .....	300
6.4.1	火灾和爆炸的防止 .....	300
6.4.2	临界的防止 .....	301
6.4.3	屏蔽和密封 .....	301
6.4.4	后处理设施的核保障措施 .....	302
6.5	后处理厂辐射防护 .....	307
6.5.1	辐射安全措施 .....	307
6.5.2	辐射源及屏蔽 .....	310
6.5.3	辐射剂量限值 .....	311
	参考文献 .....	312
7	放射性废物管理及处理 .....	313
7.1	核废物管理概述 .....	313
7.2	核废物的来源 .....	314
7.2.1	核燃料循环前段 .....	315
7.2.2	反应堆运行 .....	317
7.2.3	核燃料循环后段 .....	318
7.3	核废物的分类 .....	324
7.4	低放废物处理 .....	327
7.4.1	放射能释放的降低对策 .....	327
7.4.2	低放废物的减容 .....	329
7.5	高放废物处理 .....	332
7.5.1	高放废物处理特点及其概述 .....	332
7.5.2	高放废液的预处理 .....	334
7.5.3	高放废液固化 .....	344
7.6	反应堆退役 .....	361
7.6.1	概述 .....	361

7.6.2	退役技术 .....	362
7.7	放射性废物的处置 .....	367
7.7.1	概述 .....	367
7.7.2	地质处置 .....	368
7.7.3	低放废物的管理与处置 .....	371
	参考文献 .....	375
<b>8</b>	<b>先进核燃料循环研究进展 .....</b>	<b>377</b>
8.1	先进核燃料循环体系的概念 .....	377
8.2	先进后处理技术的必要性 .....	379
8.3	先进水法后处理技术 .....	381
8.3.1	PUREX 流程的改进研究 .....	381
8.3.2	利用新型萃取剂的萃取技术 .....	385
8.3.3	其他湿法后处理新技术 .....	388
8.3.4	MA 分离技术 .....	393
8.3.5	FP 分离技术 .....	403
8.3.6	水法分离技术概括 .....	403
8.4	干法后处理先进技术 .....	408
8.4.1	干法分离的原理和特征 .....	408
8.4.2	金属燃料熔盐电解后处理技术 .....	408
8.4.3	基于活性 Al 阴极的干法后处理方法 .....	411
8.4.4	氧化物燃料熔盐电解后处理技术 .....	413
8.4.5	干法分离技术概括 .....	415
8.5	干法/湿法相结合的后处理流程 .....	416
8.5.1	日立的 FLUOREX 流程 .....	416
8.5.2	上海交通大学的 FluoMato 流程 .....	417
8.5.3	日本东芝的 Aqua·Pyro 流程 .....	420
8.6	钍铀循环体系 .....	421
8.6.1	钍铀循环的意义及特征 .....	421



8.6.2 钍铀循环的水法后处理 .....	423
8.6.3 钍铀循环的干法后处理 .....	425
8.7 嬗变技术概述 .....	427
8.7.1 利用快中子堆进行嬗变 .....	428
8.7.2 利用 ADS 进行嬗变 .....	428
参考文献 .....	430
索引 .....	433