

核燃料工艺技术丛书

动力堆核燃料 后处理工学

丛书主编 王俊峰

主 编 章泽甫 王俊峰 张天祥

副主编 任凤仪 王 健

中国原子能出版社

TL24
04

013033820

核燃料工艺技术丛书

动力堆核燃料后处理工学

丛书主编 王俊峰
主 编 章泽甫 王俊峰 张天祥
副主编 任凤仪 王 健



本书由中核四〇四有限公司资助出版

TL 24
04



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

动力堆核燃料后处理工学/章泽甫,王俊峰,张天祥主编.

—北京:中国原子能出版社,2012.6

(核燃料工艺技术丛书/王俊峰主编)

ISBN 978-7-5022-5534-3

I. ①动… II. ①章… ②王… ③张… III. ①动力堆

—核燃料后处理—研究 IV. ①TL24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108982 号

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了动力堆核燃料后处理前端处理、化学分离和尾端处理等工艺全过程,并详细介绍了与之相关的生产设备、仪表、分析监测、辐射防护、放射性废物的处理和处置、临界安全与控制、工厂运行、去污和维修等工程技术问题。

本书可供从事核燃料后处理科研、设计、生产和教学的人员参考。

动力堆核燃料后处理工学

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 卫广刚 侯茸方

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 44.25 字 数 1129 千字

版 次 2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5534-3 定 价 204.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

《核燃料工艺技术丛书》

编委会

编审委员会

主 编	王俊峰					
副 主 编	张天祥	姚守忠	胡晓丹	韩建平	李江颖	张燕春
常务副主编	张天祥	胡晓丹				
委 员	(按姓氏笔画为序)					
	丁戈龙	于红箭	王 健	王春生	王剑英	车明生
	卢明义	任凤仪	刘坤贤	闫心智	李天福	杨掌众
	吴 伟	吴印清	吴秋林	张 伟	张文祥	张慧忠
	陆治美	陈永红	周镇兴	栗万仁	贾瑞和	高义伦
	高天祥	陶精言	第五永清	章泽甫	梁淑珍	董俊明
	韩秉魁	惠宏伟	景风坤	程沁澄		

办公室

主 任	丁戈龙					
副 主 任	刘文彬	代云水				
成 员	(按姓氏笔画为序)					
	王 邵	王海峰	刘大伟	吴艳平	余东昌	徐玉杰
	蒋建国					

《核燃料工艺技术丛书》

编辑出版委员会

(中国原子能出版社)

主 任	侯惠群					
副 主 任	杨树录					
成 员	(按姓氏笔画为序)					
	丁怀兰	卫广刚	王 丹	王 青	王艳丽	刘 岩
	刘 朔	张关铭	张铤清	赵志军	侯茸方	韩 霞
	谭 俊					

《动力堆核燃料后处理工学》

编 审 人 员

主 编 章泽甫 王俊峰 张天祥

副 主 编 任凤仪 王 健

参与编写人员 (按姓氏笔画为序)

丁戈龙	刁妍红	王宏斌	王剑英	王海峰	石秀高
石雨霞	任正茂	朱长兵	刘恩鹏	孙 明	李 娟
李 静	李振福	吴 涛	吴文凯	吴秋林	何坤泉
张东明	陈应明	陈建霞	周镇兴	赵良勇	胡东爽
段五华	郭建锋	唐成寿	曹 希	崔玉琳	鹿小庆
梁琼彪					

审 校 人 员 (按姓氏笔画为序)

王建晨	卢明义	刘坤贤	吴春喜	吴秋林	吴继宗
陈 靖	林漳基	林懋贞	金立云	郑卫芳	郑华铃
贾瑞和	梁俊福	蒋云清	韩秉魁	焦荣洲	

总 序

核燃料循环产业是核工业发展的基础。核燃料循环产业的工业体系建设是核工业核心能力的重要组成部分。掌握核燃料循环工业体系各环节的专门工艺和技术是实现核燃料循环的理论向实践、科研实验向工业生产转化的关键环节。

经过五十多年的努力奋斗,特别是经过老一辈核燃料循环专家的刻苦攻关,我国相继突破了铀转化、核燃料后处理、铀钚冶金、氙生产等核燃料循环中的关键工艺环节,取得了一大批创新成果,积累了大量的宝贵经验和工艺技巧,为我国核工业的快速发展奠定了坚实的基础。

为了系统地总结我国核燃料循环领域工艺技术的自主创新成果,借鉴吸收国外同行的最新进展,在广泛吸取我国核燃料各领域专家意见的基础上,中国核工业集团公司所属中核四〇四有限公司、中国原子能科学研究院联合清华大学,历时四年,终于将《核燃料工艺技术丛书》编辑出版。

作为一名长期从事核燃料循环领域科研和生产的科技工作者,我对于核燃料循环技术在向工业化转化中突破工艺和掌握技术的复杂性和艰巨性有着深刻的体会,对于殚精竭智、献身于我国核燃料循环的众多专家学者怀有由衷的敬意和深厚的感情,对于我国核燃料循环产业的发展壮大充满无限的期望和信心。

我相信,此套丛书的出版必将促进我国核燃料循环领域工艺技术的系统化和科学化发展,推动核燃料循环产业的不断技术创新与进步,鼓舞和激励核燃料循环科研生产一线的广大干部职工,薪火相传,奋发图强,为我国核燃料循环产业的持续健康发展做出更大的贡献。

最后,感谢长期以来大力支持中国核工业集团公司核燃料循环产业的国家相关部委和地方政府的各级领导,感谢长期关心指导中国核工业集团公司核燃料循环产业发展的各领域的专家学者。

祝我国核燃料循环领域的工艺技术不断取得新的突破,我国核燃料循环产业取得更大的发展。

中国核工业集团公司总工程师

雷增光

2011年12月

序

十分欣喜地读了《动力堆核燃料后处理工学》书稿，它是继《核燃料后处理工学》一书出版后，又一本关于核燃料循环领域方面的重要著作。当前，我国核能正在进入为国家经济建设作出更大贡献的时期，该书的出版必将为核科技界做出不可或缺贡献。

本书的作者都是在核燃料后处理方面造诣很深的专家，在核燃料后处理科研、生产领域中经历了近五十年的实践，积累了十分宝贵的经验，取得了卓有成效的成就。现在他们能不辞辛劳写出这本巨作，贡献给我国核工业创业的第二个春天，应当深深地感谢他们。

本书把科学、工程、运行与有关的安全知识结合起来，详细地介绍给读者，使它既可作为核工业中核燃料后处理工作者必备的参考用书，又可作为使学生学到系统全面知识的课堂教材。这本书的出版是我国核科技界的幸事。

中国科学院院士

王方定

2011年4月

前 言

核燃料后处理是核燃料循环的必由之路,是实现核能可持续发展的重要途径。

20世纪70年代,大型生产堆核燃料后处理厂相继投入运行,取得了优质产品和丰硕的科研成果,积累了大量的生产实践经验,培养锻炼了一批优秀人才。通过理论和实践的认真总结,中国科学院姜圣阶院士领衔编著了《核燃料后处理工学》。

核能的开发利用是人类解决能源需求的希望之路。随着核能和平利用的成功发展,1983年,中国提出了“发展核电必须相应发展后处理”的技术路线,以便实现核燃料闭路循环政策,核电的蓬勃发展带动了后处理事业的快速前进。当前,我国动力堆燃料后处理中间试验厂已进入试生产运行阶段;动力堆燃料大型后处理厂进入了设计、筹建阶段,而后还要陆续筹建更大规模的核燃料后处理工厂。

为了提高人才的素质,以便满足核能可持续发展的需求,我们编著了这本《动力堆核燃料后处理工学》,实际上它是《核燃料后处理工学》的姊妹篇。

本书共11章。第1章概述了核燃料循环和后处理的相互关系以及后处理在核燃料循环中的地位、作用和发展概况;第2章介绍反应堆的核反应、反应性控制、不同动力堆类型、燃料组成及乏燃料性质;第3章论述了锕系元素、镧系元素、裂片元素的化学性质,重点突出了水溶液化学;第4章论述了首端处理、化学分离和尾端处理等工艺过程,突出了动力堆核燃料的Purex化学分离过程,简要介绍了快堆、钍堆、实验堆乏燃料处理过程;第5章介绍了后处理过程产生的放射性三废的处理、处置的原理、方法;第6章描述了动力堆核燃料后处理过程采用的主要设备和设施;第7章概述了后处理厂主要检测仪表和主要工艺设备的调节系统以及典型的检测和控制系統;第8章介绍了工艺过程中离线分析检测、在线分析检测以及核材料衡算分析的各种方法及相应的分析仪器和装置;第9章概述了核辐射防护知识,辐射源项,辐射监测以及辐射事故的分级及处理。第10章介绍了核临界安全知识、核临界控制的原则和措施,还介绍了后处理临

界控制经验和临界事故及评价方法。第 11 章介绍后处理厂的生产运行、清洗去污,以及设备维修等工程技术问题。

本书的特点可以概括为:突出了动力堆核燃料后处理这个主题;坚持并贯彻了理论联系实际的原则,既有工艺理论深入浅出的论述,又有工程实践经验具体而又实用的总结;较好地处理了当前实用和今后发展的关系,既重点论述了动力堆核燃料后处理的工艺理论与实践经验,又概述了快堆、钍堆以及实验堆乏燃料处理的知识。

本书大多数撰稿者是活跃在生产第一线的骨干,王俊峰组织了本书的编写工作,张天祥对本书进行了技术指导,具体执笔的同志有章泽甫(第 1~4 章),刘恩鹏、胡东爽(第 5 章),何坤全、崔玉琳、吴秋林、段五华、陈建霞、石秀高、吴涛、吴文凯、梁琼彪、石雨霞、朱长兵、陈应明(第 6 章),王剑英、李静、张东明、王宏斌(第 7 章),丁戈龙、郭建锋、李娟、曹希(第 8 章),孙明、鹿小庆、赵良勇(第 9 章),周镇兴、李振福、赵良勇(第 10 章),任正茂、刁妍红、唐成寿(第 11 章)。任凤仪对全书进行了统稿。

中国科学院资深院士、著名的核科学家王方定先生为本书作了序。林漳基、林懋贞、蒋云清、郑华铃、吴春喜、吴秋林、吴继宗、金立云、焦荣洲、梁俊福、郑卫芳、王建晨、陈靖、刘坤贤、卢明义、贾瑞和、韩秉魁、王健、王邵等专家对全书或部分章节进行了认真审阅,提出了许多宝贵的意见和建议。中核四〇四有限公司核信息中心的诸位同志及吴涛、吉头杰、何海静、寇子琦、邓锡斌、王海峰同志为本书的出版做了大量的工作。对此我们一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2011 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 核能、核燃料、核燃料循环与核燃料后处理	(1)
1.1.1 核能	(2)
1.1.2 核燃料	(6)
1.1.3 核燃料循环	(9)
1.1.4 核燃料后处理	(12)
1.2 核燃料后处理的意义	(13)
1.2.1 后处理是充分利用铀资源的有效途径	(13)
1.2.2 后处理可以减少放射性废物量	(13)
1.2.3 后处理可以降低长寿命核素的危害	(14)
1.2.4 后处理是增强综合国力的需要	(14)
1.3 核燃料后处理的主要过程和基本要求	(15)
1.3.1 后处理的主要过程	(15)
1.3.2 后处理过程的主要特点	(16)
1.3.3 主要产品及其形式	(16)
1.3.4 产品质量指标	(17)
1.3.5 乏燃料性质对后处理的影响	(18)
1.3.6 处理乏燃料的不同路线	(20)
1.4 后处理工艺发展概况	(21)
1.4.1 水法流程发展概况	(21)
1.4.2 干法流程发展概况	(23)
1.5 核燃料后处理的发展展望	(23)
1.5.1 后处理的过去和现状	(23)
1.5.2 我国核燃料后处理的发展展望	(26)
参考文献	(28)
第 2 章 反应堆概述	(30)
2.1 反应堆内的核反应	(30)
2.1.1 核反应	(30)
2.1.2 裂变中子	(31)
2.1.3 裂变产物	(33)
2.1.4 核裂变释放的能量	(33)
2.2 反应堆的链式反应与临界理论	(34)
2.2.1 链式反应	(34)
2.2.2 反应堆的临界控制	(40)

2.3 反应堆的类型及其组成	(43)
2.3.1 反应堆的类型	(43)
2.3.2 几种典型核反应堆	(46)
2.3.3 反应堆本体的组成和结构	(61)
2.3.4 反应堆回路系统的组成和结构	(71)
参考文献	(72)
第 3 章 核燃料及裂变元素化学	(73)
3.1 铀化学	(75)
3.1.1 金属铀	(75)
3.1.2 铀的化合物	(78)
3.1.3 铀的水溶液化学	(80)
3.1.4 铀盐	(84)
3.2 钚化学	(88)
3.2.1 金属钚	(88)
3.2.2 钚的化合物	(89)
3.2.3 钚的水溶液化学	(91)
3.3 次锕系元素化学	(105)
3.3.1 镎化学	(105)
3.3.2 镅化学	(110)
3.3.3 镅化学	(114)
3.4 钍化学	(116)
3.4.1 金属钍	(116)
3.4.2 钍的化合物	(117)
3.4.3 钍的水溶液化学	(118)
3.4.4 钍盐	(120)
3.5 镧化学	(120)
3.5.1 金属镧	(120)
3.5.2 镧的化合物	(120)
3.5.3 镧的水溶液化学	(121)
3.6 裂变元素化学	(122)
3.6.1 锆的硝酸水溶液化学	(122)
3.6.2 铌的硝酸水溶液化学	(124)
3.6.3 钽的硝酸水溶液化学	(124)
3.6.4 钨的水溶液化学	(126)
3.6.5 稀土元素化学	(128)
3.6.6 挥发性裂变元素化学	(133)
参考文献	(137)
第 4 章 核燃料后处理工艺过程	(138)
4.1 首端处理过程	(138)

4.1.1	概述	(138)
4.1.2	乏燃料的冷却和运输	(140)
4.1.3	动力堆乏燃料的去壳和溶解	(142)
4.1.4	其他堆型乏燃料的首端处理	(150)
4.1.5	料液的澄清和调整	(153)
4.2	溶剂萃取分离过程	(155)
4.2.1	溶剂萃取过程中的基本概念和基本参数	(155)
4.2.2	TBP 萃取铀、钍、钷、镅和裂变元素的化学行为及其影响因素	(161)
4.2.3	Purex 流程的原理、应用和发展历程	(184)
4.2.4	溶剂降解及其对萃取过程的影响	(251)
4.3	尾端处理过程	(263)
4.3.1	钷的尾端处理	(263)
4.3.2	铀的尾端处理	(275)
4.4	典型动力堆核燃料后处理厂的经验	(282)
4.4.1	首端过程	(283)
4.4.2	化学分离过程	(287)
4.5	核燃料后处理的创新策略	(302)
4.5.1	发展中的先进核燃料后处理流程	(302)
4.5.2	先进后处理流程分离技术	(309)
	参考文献	(314)
第 5 章	放射性废物的处理和处置	(316)
5.1	概述	(316)
5.2	放射性废物的分类及其性质	(317)
5.2.1	放射性废物的分类	(317)
5.2.2	放射性废物的性质	(318)
5.3	放射性废物的管理	(320)
5.3.1	概述	(320)
5.3.2	国际原子能机构(IAEA)发布的放射性废物管理的九项基本原则	(320)
5.3.3	辐射防护与安全	(322)
5.4	放射性废物的处理	(323)
5.4.1	气载放射性废物的处理	(323)
5.4.2	放射性废液的处理	(334)
5.4.3	放射性固体废物的处理	(378)
5.5	废物最少化	(381)
5.5.1	废物最少化的意义	(381)
5.5.2	废物最少化的途径	(382)
5.6	放射性废物的处置	(390)
5.6.1	中低放废物的处置	(390)
5.6.2	高放废物的处置	(393)

5.6.3	极低放废物的处置	(394)
	参考文献	(397)
第6章	生产设备与设施	(398)
6.1	乏燃料贮存设施	(398)
6.1.1	湿法贮存	(399)
6.1.2	干法贮存	(403)
6.1.3	几种贮存技术的比较	(406)
6.2	剪切机	(406)
6.2.1	剪切机的组成与功能	(406)
6.2.2	剪切机的发展历程	(407)
6.2.3	剪切机的种类及其优缺点	(408)
6.2.4	剪切机的操作程序	(408)
6.2.5	剪切机在几个后处理厂的应用情况	(409)
6.3	溶解器	(418)
6.3.1	间歇式溶解器	(419)
6.3.2	连续溶解器	(421)
6.3.3	控制溶解器的临界安全	(422)
6.3.4	开发和应用新型材料的溶解器	(423)
6.4	沉降离心机	(424)
6.4.1	过滤溶解液的必要性	(424)
6.4.2	沉降分离方法	(424)
6.4.3	沉降离心法的基本原理	(425)
6.4.4	沉降离心机	(425)
6.5	混合澄清槽	(428)
6.5.1	概述	(428)
6.5.2	混合澄清槽的种类	(429)
6.5.3	混合澄清槽的结构	(435)
6.5.4	混合澄清槽的流体力学性能	(437)
6.5.5	混合澄清槽的传质性能	(439)
6.5.6	混合澄清槽的操作运行	(443)
6.6	脉冲萃取柱	(445)
6.6.1	脉冲萃取柱结构	(446)
6.6.2	萃取柱的脉冲系统	(450)
6.6.3	脉冲萃取柱运行参数的测量系统	(456)
6.6.4	脉冲萃取柱的流体力学	(457)
6.6.5	脉冲萃取柱的传质性能	(463)
6.6.6	脉冲萃取柱的操作运行	(469)
6.7	离心萃取器	(471)
6.7.1	概述	(471)

6.7.2	离心萃取器的分类	(472)
6.7.3	离心萃取器的种类	(473)
6.7.4	各种操作条件对萃取过程的影响	(476)
6.7.5	离心萃取器在核燃料后处理中的应用	(478)
6.8	流体计量和输送装置	(479)
6.8.1	空气升液装置	(479)
6.8.2	库斗流量计	(482)
6.8.3	蒸汽喷射泵	(483)
6.8.4	柱塞计量泵	(485)
6.9	工艺样品取样、送样装置	(487)
6.9.1	装置结构及功能	(487)
6.9.2	操作程序	(490)
6.10	过滤设备	(491)
6.10.1	排风过滤器	(491)
6.10.2	真空过滤器	(501)
6.10.3	有机溶剂过滤器	(504)
6.11	铀、钚尾端处理设备	(505)
6.11.1	流化床	(505)
6.11.2	草酸钚环形沉淀槽	(523)
6.11.3	草酸钚焙烧炉	(526)
6.11.4	破坏沉淀母液草酸环形槽	(528)
	参考文献	(530)
第7章	生产过程的检测和控制	(531)
7.1	概述	(531)
7.1.1	生产过程对检测和控制的要求	(531)
7.1.2	后处理厂的主要检测仪表及主要工艺设备的调节系统	(531)
7.2	后处理厂常用的几类检测仪表	(532)
7.2.1	热电偶温度计	(532)
7.2.2	质量流量控制器	(533)
7.2.3	库斗流量计	(534)
7.2.4	吹气仪表	(535)
7.2.5	超声波脉冲振幅仪和超声波界面仪	(539)
7.3	控制装置	(540)
7.3.1	DCS 系统简介	(540)
7.3.2	DCS 系统在后处理厂的应用	(541)
7.3.3	调节阀	(542)
7.4	几种典型的检测与控制	(543)
7.4.1	典型的检测	(543)
7.4.2	典型的控制	(549)

7.5 检测和控制装置的维护与检修	(557)
7.5.1 日常维护	(557)
7.5.2 检修	(559)
参考文献	(560)
第8章 分析检测	(562)
8.1 概述	(562)
8.1.1 分析检测的任务	(562)
8.1.2 分析检测的特点	(562)
8.1.3 分析方法的选择	(563)
8.2 分析检测技术	(564)
8.2.1 离线分析检测	(564)
8.2.2 在线分析检测	(593)
8.3 核材料衡算分析	(599)
8.3.1 核材料衡算平衡区的划分	(599)
8.3.2 核材料衡算关键测量点	(600)
8.3.3 核材料衡算分析方法	(600)
8.4 核燃料后处理分析技术的现状及发展	(601)
参考文献	(602)
第9章 核辐射安全防护	(603)
9.1 概述	(603)
9.1.1 防护原则	(603)
9.1.2 辐射防护的基本概念	(603)
9.1.3 辐射防护标准	(605)
9.1.4 辐射防护措施	(606)
9.2 后处理厂的辐射源项	(608)
9.2.1 后处理厂的特点	(608)
9.2.2 后处理厂的辐射特性	(609)
9.2.3 生产过程中的辐射危害	(615)
9.3 后处理厂的辐射监测	(619)
9.3.1 工作场所外照射监测	(620)
9.3.2 工作场所的空气污染监测	(622)
9.3.3 表面污染监测	(623)
9.3.4 个人剂量监测	(623)
9.3.5 中子监测	(626)
9.3.6 流出物监测	(626)
9.3.7 临界事故报警	(627)
9.4 辐射事故分级及管理	(627)
9.4.1 核辐射事故(事件)分级	(627)
9.4.2 辐射事故的处理	(628)

9.4.3	事故现场处理的一般原则	(629)
9.4.4	辐射事故原因分析	(629)
9.4.5	辐射防护人员在事故发生后应进行的工作	(630)
9.4.6	进入事故现场前的准备工作	(630)
	参考文献	(631)
第 10 章	核临界安全与控制	(632)
10.1	概述	(632)
10.1.1	自持链式反应与临界条件	(632)
10.1.2	影响系统临界性能的主要因素	(632)
10.1.3	临界事故的一般特征及其危害	(634)
10.1.4	临界参数	(634)
10.1.5	单参数临界控制值确定法	(636)
10.2	核临界控制的基本原则与措施	(636)
10.2.1	基本原则	(636)
10.2.2	控制措施	(639)
10.3	乏燃料贮存设施的临界安全	(640)
10.4	动力堆核燃料后处理厂的临界安全	(641)
10.4.1	临界控制的特点	(641)
10.4.2	临界控制的设计准则	(642)
10.4.3	主要工艺步骤的临界控制要点	(644)
10.5	核燃料后处理厂控制临界的经验	(647)
10.5.1	控制沉淀设备中草酸钍结疤量	(648)
10.5.2	控制钍线系统中的钍沉积量	(648)
10.5.3	处理积存在水相料液贮罐中含钍有机相	(648)
10.5.4	控制 1B 槽内钍不正常浓集的措施	(648)
10.5.5	非均匀固体中子毒物的应用与监测	(649)
10.5.6	中子监测仪的监控作用	(649)
10.6	临界事故监测与报警	(649)
10.6.1	临界报警系统覆盖要求	(649)
10.6.2	临界事故报警系统的设计要求	(650)
10.7	核临界事故及评价方法	(651)
10.7.1	核临界事故概况	(651)
10.7.2	核临界事故评价方法	(656)
10.7.3	临界事故规模简化估算	(658)
10.7.4	汲取临界事故教训、完善控制措施	(660)
	参考文献	(668)
第 11 章	工厂运行、去污和维修	(670)
11.1	工厂开、停车简介	(670)
11.1.1	开车	(670)

11.1.2	停车	(671)
11.2	清洗去污	(673)
11.2.1	清洗去污的目的	(673)
11.2.2	清洗去污的若干规定	(673)
11.2.3	清洗去污的方法	(674)
11.2.4	后处理厂的去污技术	(675)
11.2.5	清洗去污剂	(678)
11.2.6	常用的去污方法	(679)
11.2.7	典型设备的清洗去污	(680)
11.2.8	其他污染的去除	(680)
11.3	设备维修	(681)
11.3.1	维修的原则与方法	(681)
11.3.2	设备维修机具	(683)
	参考文献	(688)