



《中国工程物理研究院科技丛书》第068号

氚化学与工艺学

Tritium Chemistry and Technology

彭述明 王和义 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 068 号

氚化学与工艺学

Tritium Chemistry and Technology

彭述明 王和义 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是一本论述氟的理化性质与行为、分析与测量、燃料循环、处理处置、防护等核心技术及其应用的专业性参考书。书中以图表等形式列举了大量的实验数据,并给出相关的文献信息。该书对从事该领域的年轻科技工作者具有重要的参考价值,也可作为核燃料循环与材料专业学生及研究生的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

氟化学与工艺学/彭述明,王和义主编.——北京:国防工业出版社,2015.4

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978-7-118-10026-6

I. ①氟... II. ①彭... ②王... III. ①氟—化学性质②氟—化工生产 IV. ①TQ122.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 074898 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20½ 字数 462 千字

2015 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 58.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 50 年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科技任务。通过完成任务,在许多专业领域里,不论是在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 50 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书自 1989 年开始出版,在今后一段时期还将继续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 50 年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编 审 委 员 会

2008 年 5 月 8 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》

第七届编审委员会

学术顾问 杜祥琬

编委会主任 彭先觉

副主任 孙承纬 汪小琳 赵武文

委员 王 韬 帅茂兵 田 勇 李 凡 李正宏
(按姓氏笔画排序)

李泽仁 李敬明 吴兴春 何建国 何宴标

张 凯 张 健 张文平 张方晓 张保汉

陈贤林 罗文华 孟凡宝 赵 峰 赵 强

赵小东 袁光伟 莫 军 黄秀光 彭述明

舒远杰 曾 超 魏晓峰

科技丛书编辑部

负责人 唐 勇

本 册 编 辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》

公开出版书目

- | | | |
|-----|--------------------------|---------------------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山 周芬芬 主编 | 科学出版社 1989 年 11 月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥 编著 | 科学出版社 1990 年 02 月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人 陈大年 编著 | 国防工业出版社 1991 年 09 月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家贛 著 | 科学出版社 1991 年 12 月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 06 月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册)
谢铭勋 编著 | 国防工业出版社 1992 年 12 月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌 著 | 国防工业出版社 1992 年 10 月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式的粘性
郭柏灵 著 | 科学出版社 1993 年 03 月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲 等著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 011 | 半导体材料的辐射效应
曹建中 等著 | 科学出版社 1993 年 05 月 |
| 012 | 炸药热分析
楚士晋 著 | 科学出版社 1993 年 12 月 |
| 013 | 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆 等著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 014 | 放射性核素活度测量的方法和技术
古当长 著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |
| 015 | 二维非定常流和激波
王继海 著 | 科学出版社 1994 年 12 月 |

- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南 著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士 著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金 编著 国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成象技术与图象处理
吴世法 编著 国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿 著 国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理
赖祖武 等编著 国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云 编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 实验核物理测量中的粒子分辨
段绍节 编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦 著 科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统
郭柏灵 著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德 编著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线
金显盛 著 国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬 卫玉章 周之奎 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用
王光瑞 于熙龄 陈式刚 编著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 气体炮原理及技术
王金贵 编著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与冲击波
李维新 编著 国防工业出版社 2001 年 05 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术
孙景文 编著 国防工业出版社 2001年08月
- 036 含能材料热谱集
董海山 胡荣祖 姚 朴 张孝仪 编著 国防工业出版社 2001年10月
- 037 材料中的氦及氖渗透
王佩璇 宋家树 编著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体X射线谱学
孙景文 编著 国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张 钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004年06月
- 040 系统可靠性工程
金碧辉 主编 国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料 γ 特征谱的测量和分析技术
田东风 龚 健 伍 钧 胡思得 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统
苏 毅 万 敏 编著 国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统
郭柏灵 高 平 陈瀚林 著 国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应
陈盘训 著 国防工业出版社 2004年06月
- 045 高功率脉冲技术
刘锡三 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 046 热电池
陆瑞生 刘效疆 编著 国防工业出版社 2004年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论
方泉玉 颜 君 著 国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统
郭柏灵 林国广 尚亚东 著 国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术
经福谦 陈俊祥 主编 国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器
邓建军 主编 国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数
田东风 孙伟力 编著 国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引
谭 华 著 国防工业出版社 2007年03月
- 053 核军备控制核查技术概论
刘成安 伍 钧 编著 国防工业出版社 2007年03月

- 054 强流粒子束及其应用
刘锡三 著
国防工业出版社 2007 年 05 月
- 055 氟和氟的工程技术
蒋国强 罗德礼 陆光达 孙灵霞 编著
国防工业出版社 2007 年 11 月
- 056 中子学宏观实验
段绍节 编著
国防工业出版社 2008 年 05 月
- 057 高功率微波发生器原理
丁武 著
国防工业出版社 2008 年 05 月
- 058 等离子体中辐射输运和辐射流体力学
彭惠民 编著
国防工业出版社 2008 年 08 月
- 059 非平衡统计力学
陈式刚 编著
科学出版社 2010 年 02 月
- 060 高能硝胺炸药的热分解
舒远杰 著
国防工业出版社 2010 年 06 月
- 061 电磁脉冲导论
王泰春 贺云汉 王玉芝 著
国防工业出版社 2011 年 03 月
- 062 高功率超宽带电磁脉冲技术
孟凡宝 主编
国防工业出版社 2011 年 11 月
- 063 分数阶偏微分方程及其数值解
郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著
科学出版社 2012 年 01 月
- 064 快中子临界装置和脉冲堆实验物理
贺仁辅 邓门才 编著
国防工业出版社 2012 年 02 月
- 065 激光惯性约束聚变诊断学
温树槐 丁永坤 等编著
国防工业出版社 2012 年 04 月
- 066 强激光场中的原子、分子与团簇
刘杰 夏勤智 傅立斌 著
科学出版社 2014 年 02 月
- 067 螺旋波动力学及其控制
王光瑞 袁国勇 著
科学出版社 2014 年 11 月
- 068 氟化学与工艺学
彭述明 王和义 主编
国防工业出版社 2015 年 04 月

序

氟在我国国防以及国民经济中都扮演了重要的角色,在我国大力发展核电以及快速推进核聚变研究的前提下,对氟操作所涉及的性能、工艺、防护及处理处置等知识提出了迫切的需求,本书就是在这样的背景下产生的。

由于氟技术的敏感性以及氟的特殊性质,一直以来都受到国际《核不扩散条约》的控制。虽然我国已加入 ITER 计划,并准备参与相关的实验工作,可以分享到有关的核心技术,但氟技术则不在分享的范围内。因此,为了获得自己的氟技术,各有核国家均开展了大量的研究工作,希望掌握自己的氟相关技术。

中国工程物理研究院已有几十年的氟操作经验,也是目前国内氟操作量最大的科研单位,在相关领域开展了大量的基础研究以及工艺开发工作,掌握了大量的包括氟的理化性质与行为、分析与测量、燃料循环、处理处置、防护等核心技术,并在氟的应用方面进行了一系列的尝试。

编写本书的成员都是长期从事该领域研究的科研人员。编写本书也是对我国在该领域研究成果的总结。

我相信本书的出版,必将对我国从事该领域的年轻科技工作者有所帮助,并使他们较快地了解从事该领域研究所需的理论与技术,从而促进我国核聚变事业的快速发展。

2014 年 11 月 6 日

前 言

氚作为氢的一种同位素,在国防科技以及国民经济中都有着广泛的应用。尤其是在核武器研制、磁约束核聚变(如 ITER、EAST、HL-2、CFETR 等)和惯性约束核聚变(如 NIF、ICF 等)研究的带动下,氚化学与工艺学取得了巨大的发展。

氚与氘反应具有反应截面大、反应速率高、释放能量大以及点火温度低等优点,因此氚氘燃料循环是聚变能源的核心。聚变能源一旦开发成功,人类将获得充足的清洁能源,不仅可以缓解一直困扰人们的能源危机,而且还将有效改善日趋恶化的人类生存环境。在 NIF 取得初步成功、EAST 实现较长脉冲点火、ITER 即将建成、CFETR 即将提上日程等一系列重大事件的刺激下,对氚化学与氚工艺学的研究需求将达到前所未有的高度。

由于氚技术的特殊背景,一直受到国际核不扩散条约的控制,因此,虽然通过参加 ITER 可以享有相关技术,但氚技术则不在此范围,只能靠各国自力更生。为了满足自己的氚科学研究与应用需求,多数核国家均开展了大量的研究工作,这些研究成果都将成为氚化学与工艺学研究,尤其是聚变能源研究的重要基础。

另外,由于氚是一种 β 放射性核素,在材料中具有独特的高渗透性,导致其无论是在生产、贮存与应用方式上,还是在防护以及最终的处理处置方法上,都具有与其他材料或核素完全不同的特点,需要具备特殊的应用、防护与处理处置手段,才能真正地达到清洁、无污染。

基于以上目的,本书将在参考现有氚书籍以及国内外文献的基础上,力求概括氚化学与工艺学的最新研究成果及进展,分析氚化学与工艺学研究中存在的问题及发展方向,以便为该领域的科研人员及研究生提供有益的帮助。

本书共分 6 章。其中第 1 章氚的理化性质与行为,主要描述氚的基本物理化学性质、贮氚材料及其特性、金属氚化物中的氚行为。第 2 章氚的分析与测量,主要描述氚在固体、气体及液体中的分析技术,包括色谱、质谱、光谱以

及射线分析等方法。第3章氙的燃料循环,主要描述氙的生产、纯化、同位素分离、贮存、注入、物料衡算等技术。第4章氙废物的处理与管理,主要描述氙废物的管理,含氙污染物的去污,氙废物的收集、分类、包装、贮存、处置及涉氙设施的退役等。第5章氙的安全与防护,主要描述涉氙设施的防护要求、氙包容、氙的防护监测、环境中氙的测量、氙致剂量评估以及氙的辐射效应。第6章氙的应用,重点描述氙在中子发生器、氙光源、聚变研究、氙示踪和氙辐伏同位素电池等方面的应用情况。

全书由彭述明和王和义主编,其中第1章由彭述明、周晓松和陈森编写,第2章由王和义和陈志林编写,第3章由彭述明和陈晓军编写,第4章由彭述明和但贵萍编写,第5章由王和义和孟丹编写,第6章由彭述明和刘文科编写。在编写过程中,还得到了其他20多位科研人员在资料收集以及文稿编写等方面的帮助。

本书的出版得益于《中国工程物理研究院科技丛书》编辑部的大力支持,还得益于傅依备、孙颖、汪小琳等的大力协助,他们抽出大量的时间对全书进行了审阅并提出了宝贵的修改意见。在此对本书编辑出版给予帮助的人员一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏与错误之处,在此诚挚地欢迎广大读者提出意见与建议,以便今后加以完善。

编著者
2015年1月

目 录

第 1 章 氦的理化性质与行为	1
1.1 概述	1
1.2 氦的基本性质	2
1.2.1 氦的放射性	2
1.2.2 氦的物理性质	3
1.2.3 氦的化学性质	4
1.2.4 氦的核聚变性质	6
1.2.5 氦的热力学性质	6
1.3 氦与材料的相互作用	7
1.3.1 氦与聚合物材料的相互作用	9
1.3.2 氦与多孔材料的相互作用	11
1.3.3 氦对金属结构材料性能的影响	15
1.3.4 氢同位素对材料物理性能的影响	18
1.4 贮氦材料及其特性	24
1.4.1 典型金属贮氦材料体系	24
1.4.2 典型贮氦材料的性能及应用	28
1.5 金属氦化物中的氦行为	32
1.5.1 金属氦化物中 ³ He 的能量状态	33
1.5.2 金属氦化物中 ³ He 的迁移扩散	33
1.5.3 金属氦化物中 ³ He 的行为机制	35
1.5.4 金属氦化物中 ³ He 的时效行为	41
参考文献	51
第 2 章 氦的分析与测量	60
2.1 概述	60
2.2 β 诱发 X 射线谱分析	61
2.2.1 BIXS 发展历程	61
2.2.2 BIXS 的理论基础	62
2.2.3 BIXS 氦信息获取方法	63
2.3 量热法	70
2.4 成像板	73
2.5 材料中氢同位素离子束分析方法	75
2.5.1 卢瑟福背散射分析	75

2.5.2	弹性反冲探测分析	76
2.5.3	核反应分析	76
2.5.4	二次离子质谱	76
2.5.5	加速器质谱	77
2.6	气相色谱法	77
2.6.1	分离系统	78
2.6.2	检测系统	79
2.6.3	气流系统	79
2.6.4	定量方法	80
2.6.5	微色谱技术	80
2.7	拉曼光谱	83
2.7.1	拉曼光谱分析原理	83
2.7.2	氢同位素拉曼频移峰的理论计算	84
2.7.3	拉曼光谱在同位素分离系统中的应用	85
2.7.4	拉曼光谱在氢同位素反应动力学研究中的应用	86
2.7.5	拉曼光谱在热循环吸收过程中的应用	86
2.7.6	拉曼光谱在内环路测试中的应用	88
2.8	质谱	89
2.8.1	质谱分析原理	89
2.8.2	离子源	90
2.8.3	低分辨质谱氢同位素定量分析	90
2.8.4	高分辨质谱仪在氢同位素分析中的应用	91
2.9	电离室	91
2.9.1	电离室测氚原理	91
2.9.2	电离室内能量沉积率计算	92
2.9.3	小体积电离室在高浓度氚测量中的应用	98
2.10	正比计数器	99
2.11	液闪法	100
2.11.1	液闪法测氚原理	100
2.11.2	液闪测氚中需要考虑的几个重要因素	101
2.11.3	液闪测氚技术的优化	102
2.11.4	低水平液态氚测量中的制样	105
	参考文献	109
第3章	氚的燃料循环	114
3.1	概述	114
3.2	产氚包层技术	115
3.2.1	氚增殖包层	115
3.2.2	氚增殖剂材料	118
3.2.3	包层提氚技术	134

3.3	等离子体排灰气中氟的回收技术	140
3.3.1	排灰气的组成	140
3.3.2	排灰气中氟的快速回收方法	141
3.4	氢同位素分离技术	147
3.4.1	低温精馏氢同位素分离技术	147
3.4.2	色谱氢同位素分离技术	154
3.5	氟的贮存技术	157
3.5.1	氟的贮存方式	157
3.5.2	氟的各种贮存技术及应用	158
3.6	氟的衡算技术	162
3.6.1	基于PVT的氟衡算	163
3.6.2	基于质量的氟衡算	164
3.6.3	基于量热法的氟衡算	166
3.6.4	氟浓度测量技术	166
	参考文献	172
第4章	氟废物的处理与管理	178
4.1	概述	178
4.2	氟废物的来源、特点与管理	178
4.2.1	氟废物来源及特点	178
4.2.2	氟废物管理	180
4.3	氟废气处理	182
4.3.1	稀释或贮存衰变后排放	183
4.3.2	催化氧化除氟	183
4.3.3	合金除氟(消氟)	186
4.4	氟废液的处理	187
4.4.1	含氟废水的处理	187
4.4.2	含氟有机废液的处理	198
4.5	固态氟废物的处理	200
4.5.1	固态氟废物的分类及管理原则	200
4.5.2	氟污染固体材料的去污	201
4.5.3	氟污染固体废物的减容处理	203
4.5.4	氟污染固体废物的包装	204
4.5.5	含氟固体废物处置前的处理	205
4.5.6	含氟固体废物管理中包装体释氟率的监测与评价	206
4.6	氟污染废物的处置	207
4.6.1	氟废物处置方案	207
4.6.2	氟废物处置	208
4.7	氟污染设施退役	208
4.7.1	氟污染设施退役方案的制定	209

4.7.2	退役工艺	209
4.7.3	氡污染设施退役案例	212
	参考文献	222
第5章	氡的安全与防护	229
5.1	概述	229
5.2	涉氡设施的设计及管理	229
5.2.1	涉氡设施的建造设计	232
5.2.2	涉氡设施的运行设计	232
5.2.3	涉氡设施使用的安全原则和方法	233
5.3	氡的包容	234
5.3.1	氡包容设施	234
5.3.2	氡包容材料	240
5.4	氡的防护监测	241
5.4.1	氡防护监测的基本要求	241
5.4.2	氡化水的甄别测量	242
5.4.3	γ 场中氡的测量	244
5.4.4	氡表面污染水平测量	248
5.4.5	氡的取样测量	249
5.5	环境中氡的测量	251
5.5.1	流出物氡排放监测	251
5.5.2	环境空气中氡的监测	254
5.5.3	生物样中有机氡监测	256
5.6	氡致剂量评估	259
5.6.1	氡的摄入模型	259
5.6.2	内照射剂量计算	259
5.6.3	氡释放的环境影响评价	260
5.7	氡的辐射效应	262
5.7.1	氡在人体中的分布和代谢	262
5.7.2	氡的化学毒性	263
5.7.3	氡的致癌效应	263
5.7.4	氡的遗传学效应	264
5.7.5	氡的致畸效应	265
5.7.6	氡对中枢神经系统的影响	266
5.7.7	氡的相对生物效应	266
	参考文献	268
第6章	氡的应用	272
6.1	概述	272
6.2	中子发生器	273
6.2.1	中子发生器的原理及结构	273

6.2.2	中子发生器用氚靶	273
6.2.3	加速器用氚靶	277
6.2.4	中子发生器的应用	279
6.2.5	中子发生器用氚靶的发展趋势	282
6.3	氚光源	283
6.3.1	氚光源的原理及特点	283
6.3.2	氚光源亮度的影响因素	284
6.3.3	氚光源研究现状	285
6.3.4	氚光源的应用	287
6.3.5	氚光源的发展趋势	289
6.4	氚辐伏同位素电池	289
6.4.1	辐射伏特效应同位素电池的原理	289
6.4.2	能量转换特点	291
6.4.3	研究现状	292
6.4.4	辐伏同位素电池的发展趋势	296
6.5	氚示踪	296
6.5.1	氚示踪的原理及方法	296
6.5.2	氚示踪剂分类及其特点	296
6.5.3	氚示踪剂的制备	297
6.5.4	氚示踪技术的应用	297
6.5.5	氚示踪剂的发展趋势	297
6.6	聚变研究	298
6.6.1	核聚变原理及实现途径	298
6.6.2	氚在聚变研究中的应用	298
6.6.3	聚变能的应用	300
6.6.4	聚变能源的发展趋势	301
	参考文献	302
	附录 简称对照表	307