

钚手册

技术指南

(修订版)

【第一卷】

《钚手册》编译组 译

中国原子能出版社

钚手册

技术指南

(修订版)

(第一卷)

《钚手册》编译组 译

中国原子能出版社

编辑组 编

译者 译

校者 校

审者 审

编者 编

译者 译

校者 校

审者 审

编者 编

译者 译

校者 校

审者 审

编者 编

译者 译

校者 校

审者 审

编者 编

译者 译

图书在版编目(CIP)数据

钚手册:技术指南 / (美) 威克 (Wick, O. J.) 主编;
《钚手册》编译组译. —北京:中国原子能出版社,
2015. 1
ISBN 978-7-5022-6501-4

I. ①钚… II. ①威… ②钚… III. ①钚-技术手册
IV. ①TL242. 3-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311762 号

内 容 简 介

本书译自美国 O. J. WICK 主编的《PLUTONIUM HANDBOOK》(1980 年版)。全书共分两卷,七个部分共 28 章。第一卷包括物理学、冶金、化学部分;第二卷包括化学处理、钚及其合金的制备和利用、分析与检验方法、健康与安全部分。该书一直是关于钚的一本权威、重要的专著。

本书可供从事核材料和钚的科研、生产和教学的人员参考。

钚手册 技术指南

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 王 丹
装帧设计 崔 彤
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 北京画中华印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 73
字 数 1822 千字
版 次 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6501-4 定 价 380.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>
发行电话:010-68452845

E-mail: atomep123@126.com
版权所有 侵权必究

《钗手册》

(修订版)

编译人员名单

翻 译 (以姓氏笔画为序)

丁戈龙 付云杉 刘彩兵 孙银峰 李 迅

李芸菲 杨 杰 陈义武 陈庆云 陈海腾

郑立英 金显奎 梁 勇

审 校 (以姓氏笔画为序)

王春生 张文祥 杨宝光 姚守忠 贾瑞和

梁正安 焦荣洲 程沁澄 韩 义

校 对 (以姓氏笔画为序)

刁妍红 马 彤 王 邵 王 斌 代云水

刘开明 孙银峰 那娟娟 何润虎 张钟文

李芸菲 杨 莉 周运兰 周湘平 岳 亮

赵海新 黄 莹

编 辑 代云水 杨 莉 张钟文 徐玉杰

《钗手册》

(初版)

编译人员名单

翻 译 (以姓氏笔画为序)

王春生 王清辉 毕清华 李锦霞 吴德强

张文祥 张玉瑾 张树璋 周贤玉 姚爱凤

郭福庆 黄齐陶 梁淑珍 程沁澄 虞贻良

赵荣英

审 校 (以姓氏笔画为序)

刘乃丰 许立新 张 伟 张树璋 虞贻良

图表制作 刘乃丰 王道纲

出版策划 杨绍华

注：初版《钗手册》出版时未列出翻译、审校人员名单。本名单是由张文祥、梁淑珍、张伟等同志回忆的，可能存在偏差。

试读结束：需要全本请在线购买：www.ertongbook.com

译稿修订版前言

钚是人工制造的最重要的裂变元素，也是元素周期表中最复杂而神秘的元素，性质奇特而多变。钚在核能应用中具有极其重要的地位，主要用于核武器装料、核反应堆燃料、同位素电池和中子源。从1940年发现钚到钚的和平应用，人们一直没有停止对钚的研究与开发，但关于钚的详尽而完整的参考资料仍相对缺乏。

美国 O. J. WICK 主编的《钚手册》是有关钚的一部巨著，该书系统地讲述了钚的物理、化学、冶金、分析检测和保健物理的相关知识，自1967年出版后，一直是该领域唯一的一部权威著作。

1972年，212科技图书馆组织编译了该书1967年版，内部出版后引起了极大反响，获得了好评，为我国钚的科研、生产工作的开展发挥了重要作用。

1980年，该书由美国核学会重新出版，再版时对部分内容进行了修改。鉴于国内外尚无一本内容更新、更全的此种专著，而该书所述内容目前对我们仍有现实意义，因此我们对原译稿依据修订版进行了修订或重译。本修订版译稿在原译稿的基础上，增译了原著新增内容，补译了原译稿略去的内容，对原译文中出现的错误进行了更正，对文中出现的非法定单位或已废止单位进行了换算或注释（其中，对与图、公式无对应关系的计量单位直接进行了换算；反之，则在直接换算的基础上保留了原单位；对于无法进行单位换算的图、公式，则给出了换算关系），并校正了全部文字。

全书共分两卷，七个部分共28章。第一卷包括物理学、冶金、化学部分；第二卷包括化学处理、钚及其合金的制备和利用、分析与检验方法、健康与安全部分。参与翻译或修订的同志有李芸菲（前言、序言），付云杉（第1、2章），陈海腾（第3、4章），李迅（第5、8章），陈义武（第6、9章），刘彩兵（第7、17、18、19、20章），孙银峰（第10、11、12、26章），陈庆云（第13章），郑立英（第14、15、16章），杨杰、丁戈龙（第21、22、28章），梁勇（第23、24、25章），金显玺（第27章）。

张文祥、焦荣洲、王春生、杨宝光、姚守忠、贾瑞和、程沁澄、韩义、丁戈龙、梁正安等专家对修订版《钚手册》进行了审校，中核四〇四有限公司核信息中心的诸位同志及刘大伟、王海峰、吴艳萍、季靓、余东昌、陈建霞等为本书的出版做了大量的工作。对此我们一并表示感谢。

本译本是在212科技图书馆出版的原译本基础上修订而成的，在此谨向参与原译本翻译的前辈专家表示衷心感谢。

在修订版《钚手册》的编译过程中，也得到了原子能出版社、有关领导和专家的大力支持和帮助，谨向他们表示感谢！

鉴于编译人员水平有限，加之原稿涉及专业知识范围广，译文中难免有错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

译稿初版前言

本书译自1967年美国O. J. WICK主编的《铀手册》。全书分上、下两册，七个部分共二十八章。上册包括物理学、冶金、化学部分；下册包括化学处理、铀及其合金的制备和利用、分析与检验方法、健康与安全部分。

原书出版至今五年多了，但其中搜集的原始资料比较多，在目前还是一本有关铀燃料生产和科学实验方面综合性较强的技术资料，对了解这个领域的有关技术问题有一定的帮助。我们本着毛主席“洋为中用”、“一切国家的好经验我们都要学习”的教导，将它译出供工作中参考。

在翻译过程中，我们删去了原书的序言和内容索引；同时也根据我们认识所及对原书某些地方作了一些修改和文字上的少许增补。但需要特别说明的是，译本难于一一指出原书作者在叙述和评论中的资产阶级观点，请读者阅读时予以注意。

鉴于我们政治思想、业务水平低，复印时间仓促，加之本手册专业知识涉及范围很广，许多同志都是初次参加翻译工作，缺乏经验，译文中一定有很多缺点、错误和疏漏之处，我们恳请读者批评指正。

212 科技图书馆《铀手册》编译组

1972年10月1日

前 言

大约四十年以前,也就是 1941 年,我们于 2 月 23 日晚上在伯克利成功氧化了微量的新型合成元素—94 号元素,这对我们证实该新元素的发现是关键的一步。大约一年后,我们建议将此新元素命名为钷。在发现钷的过程中,我们进行了广泛研究,对其生产规模按比例扩大了 10^{18} 多倍。这四十年来,为获取与钷这种合成元素相关的庞杂知识,A. C. Wahl、J. W. Kennedy 和 E. M. McMillan 与我一起进行了大量研究实验,对此,作为一名从事钷研发工作的技术人员,我一直感到惊叹不已。

由于钷的放射毒性,对钷进行操作不是一件易事。另一方面,其放射性使其在化学研究中易于测量,并且我们设计出了安全的操作方法。相关的化学知识有助于钷的安全操作,并且针对其毒性我们也提出了应对措施。

^{239}Pu 在国际上属于市售商品,可以用作快中子增殖堆的燃料,为亟需能源的国家提供电力。但是,有人担心其毒性和可能由此引发的核武器扩散问题,于是他们可能会放弃对钷的利用。在我看来,未来的能源需求将会相当严峻,而这些问题终将得到圆满解决,世界许多国家将会采用以钷为燃料的增殖反应堆。

随着动力反应堆运行温度的提高,我们对钷这种核燃料的技术要求也将更为严格,以获得更大的热力学效率。因此,反应堆内采用陶瓷和金属陶瓷的趋势将会普遍增高,在这些陶瓷和金属陶瓷中含有的金属组分将是钷或铀和钷的混合物。这就需要考虑采取经济上可行的新型燃料后处理方法,从裂变产物中分离出易裂变同位素和可增殖同位素。因此,为充分利用核电以满足全世界不断增长的电力需求,化学技术和冶金技术将与以往一样重要。

为了制备钷化合物用作放射性同位素发电机的燃料,以及将 ^{238}Pu 作为其他类型的能源,都需要更加严苛的化学知识。一些用于月球和行星探测的装置,将 ^{238}Pu 的衰变热转化为电能。热源要在超高温下长期工作,还必须耐受异常的瞬变条件。为了研发用于心脏起搏器和人造心功能泵电源,正在研究用浓缩的 ^{16}O (通过 $\alpha\text{-n}$ 反应减少中子发射)制备超纯 ^{238}Pu 和该同位素的化合物。化学家和冶金学家已经站在了这种工作的最前沿。

由于目前可能处于集中发展钷利用的开端,而我们正处于这个时期,能够编撰一部非常全面和权威性的专著就尤其重要。对于那些将要充分利用钷,实现其未来前景的科技人员来说,这部专著应当能够提供重要的帮助。

Glenn T. Seaborg
加利福尼亚大学
伯克利,加利福尼亚
1980 年 2 月

序 言

94 号元素在 Seaborg、Wahl 和 Kennedy 等人发现以后,又戏剧性地出现在后来的长崎原子弹事件中。它不但改变了历史进程,也改变了战争理念和最终胜负,而且反过来成为维护和平的强有力工具。由于这些演变十分重要,目前钷利用的程度正处于极大扩展的初期,未来能够释放比所有可用化石燃料的能量还要大 1 000 倍的能源储量。到 1975 年,钷的年产量将达到 10 000 kg。预计到 1990 年,其产量每 5 年增加 1 倍,钷的年产值也将为十亿两千五百万美元。

长期以来,人们对钷利用表现出的兴趣一直有潜在激增的明显迹象。美国原子能委员会意识到这就需要编撰一部关于钷的专门性参考资料,而且其包含的信息量要丰富、文献种类要多样,于是技术信息部接受委托编写了这部钷手册。

编写钷手册是为了在使用钷的过程中,对受到广泛关注的课题提供有关信息,并提供钷研发技术的第一手参考资料。

对于任何一名进行钷研发工作的科技人员来说,都非常需要这些第一手参考资料,因为钷与大多数其他元素不同,它需要用多学科的方法来处理相关问题。一个领域的专家必须同时掌握其他领域的知识,例如,冶金学家必须关注钷的毒性、临界性、核反应和化学行为。有关这些课题的信息广泛分布于许多文献中,并且不易获得。而这一部钷手册就包含了钷的物理、化学、冶金、陶瓷、工程和辐射防护等独立的基本信息源。

本书分为七个独立章节:物理、冶金和陶瓷、化学、化学分离、加工和利用、分析与检验,以及辐射防护与安全。

对于这些课题的论述,反映了这些学科与钷相关所达到的不同程度的研究深度。关于化学、物理和辐射防护章节的描述最充分,对钷的冶金方面的基本描述与许多其他更普通的元素相比更为详尽。关于钷的难熔化合物这一章引入了目前先进的且快速拓展的课题。金属陶瓷的课题几乎未涉及。对于含钷的核燃料已经进行了多种实验性试验,但用钷燃料运行反应堆的实验极为有限。这些都在相关课题的章节中有所反映。

本项目为汉福特实验室分配了拟稿的任务,因为该实验室参与了钷再循环计划的热堆用钷燃料的开发,以及几种其他大型的钷燃料研究工作,例如,以钷作为材料试验堆的燃料。此外,由于该实验室与汉福特钷生产工厂联系紧密,其获得的经验为本手册的物理、化学、化学分离以及辐射防护与安全的章节提供了非常宝贵的背景信息。

洛斯阿拉莫斯科学实验室合作编写了本手册大部分有关冶金的章节。洛斯阿拉莫斯科学实验室在钷研发科技中发挥的作用是众所周知的。该实验室自 1943 年开始就从事钷武器的开发工作,1946 年又开始研究钷燃料系统,其成员首创了大部分技术。由 F. W. Schonfeld 带领的物理冶金团队负责本手册冶金章节的供稿。

本手册的所有供稿人都在其特定的专业领域,将铀研发工作作为他们职业生涯的重要组成部分。他们获得的经验既是不可替代的,也不仅仅是理论性的。所有供稿人都各司其职,在其专业领域开展了实践工作,借鉴了一些成功的重要项目、一些大型工业工厂的辐射防护和安全工作的经验,以及一些技术研发过程,并与国家目标紧密结合。

一些被分配编写独立章节的人员不仅充分利用了个人获得的丰富数据,而且还利用了其他放射性铀实验室(例如,阿贡国家实验室、Mound 实验室、Dow 化学公司的洛基弗拉茨工厂、加利福尼亚大学劳伦斯辐射实验室—利弗莫尔、核材料和设备公司、Carborundum 公司、联合核公司、英国原子武器研究所和英国原子能研究所)获得的大量数据。

该项目由美国原子能委员会技术信息部的 J. William Yong 组织。美国原子能委员会技术信息部的 Joseph G. Gratton、James D. Cape、Thomas W. Scott 和 Glenn K. Ellis 担任项目官员,或以其他方式对该工作做出了贡献。J. B. Work, 目前是美国原子能委员会的运行分析副主任,编制了项目开始时的初步建议书和大纲。Battele-西北技术信息部人员 M. Paul Burns 承担了不同投稿人稿件的格式编辑与整合的大量工作,他的工作得到了 Ethel Tomlinson 女士的有力支持。同时 Ethel Tomlinson 女士还核对了每个参考文献以确保引用的准确性和相关性。Gertrude Roach 女士打印了大部分稿件,处理了项目中所涉及的无数细节问题。

本手册的供稿人都自愿将此项工作作为职业责任,付出了个人的艰辛努力,保有并秉持了强烈的责任心承担了此项工作。除了为本项目做出直接贡献的工作人员以外,还有许多其他从事铀研发工作的人员,也都为项目提供了信息,审查了原稿并给予了大力协助。

本手册的主编向所有直接或间接参与本项目的工作人员表示诚挚的谢意!

O. J. WICK

里奇兰德,华盛顿

1967 年 3 月 10 日

目 录

第一卷

第一部分 物理学

第 1 章 钚同位素性质	3
1.1 钚的生产和使用	3
1.1.1 钚的最初生产	3
1.1.2 反应堆生产钚	4
1.1.3 钚含量对反应堆行为的影响	4
1.1.4 钚的中子辐照	5
1.2 核性质	5
1.2.1 相对核素质量	5
1.2.2 钚核的激发态	6
1.2.3 β 不稳定同位素	7
1.2.4 α 衰变	8
1.2.5 自发裂变	8
参考文献	9
第 2 章 核反应	11
2.1 慢中子反应	11
2.1.1 可能的中子诱发反应和术语	11
2.1.2 布雷特-维格纳(Breit-Wigner)单能级公式	12
2.1.3 共振之间的干扰	13
2.1.4 ^{239}Pu 的慢中子截面	14
2.1.5 ^{241}Pu 的慢中子截面	16
2.1.6 非裂变同位素的慢中子截面	17
2.1.7 其他钚同位素的中子截面	18
2.1.8 2 200 m/s 截面	18
2.1.9 积分测量结果	18
2.2 快中子截面	19
2.2.1 总截面	19

2.2.2 俘获截面	19
2.2.3 散射截面	20
2.2.4 快中子裂变截面	21
2.3 其他裂变参数	24
2.3.1 裂变的能量(关系)	25
2.3.2 瞬发中子发射	26
2.3.3 缓发中子发射	28
2.3.4 裂变产物的产额	30
参考文献	31

第二部分 冶 金

第3章 物理性质	37
3.1 同素异形形态	37
3.1.1 晶体结构和温度范围	37
3.2 纯铀的物理性质	42
3.2.1 密度和膨胀系数	42
3.2.2 相变热	44
3.2.3 比热	45
3.2.4 蒸气压、蒸发热、沸点、表面张力和黏度	47
3.2.5 压缩系数和弹性常数	47
3.2.6 热导率和电导率	48
3.2.7 磁性行为	50
3.2.8 热电势	51
3.3 铀合金的物理性质	52
3.3.1 铀-铝合金	52
3.3.2 铀-碳合金	57
3.3.3 铀-铈合金	58
3.3.4 铀-铁合金	60
3.3.5 铀-镁合金	60
3.3.6 铀-镍合金	60
3.3.7 铀-铈合金	60
3.3.8 铀-氧合金	60
3.3.9 铀-钍合金	62
3.3.10 铀-铀合金	62
3.3.11 铀-铍合金	63
3.3.12 铀-锆合金	64
3.3.13 铀-铝-硅合金	66
3.3.14 铀-铈-钴合金	66

3.3.15	钪-铀-钼合金	67
3.3.16	一些重要钪化合物的生成热	68
	参考文献	69
第4章 力学性能		75
4.1	非合金钪	75
4.1.1	拉伸性能	75
4.1.2	压缩性能	87
4.1.3	扭转性能	92
4.1.4	冲击	92
4.1.5	蠕变	93
4.1.6	疲劳	94
4.1.7	硬度	96
4.2	β 稳定钪	96
4.2.1	拉伸	97
4.2.2	压缩	98
4.2.3	时效行为	99
4.3	δ 稳定钪	99
4.3.1	钪-铝合金和钪-铈合金	99
4.3.2	钪-镓合金	108
4.4	富钪合金	114
4.4.1	钪-铁合金	114
4.4.2	钪-铀合金	115
4.4.3	钪-锆合金	115
4.4.4	其他化合物和合金	117
4.5	低钪合金	120
4.5.1	铝-钪合金的拉伸性能和硬度	120
4.5.2	铀-钼-钪合金的拉伸性能和硬度	120
4.5.3	铁-钪、钪-钪、钪-钪和铀-钪合金的硬度	125
4.5.4	铀-钪-富锆裂片合金的拉伸性能、弹性模量、弯曲、冲击、蠕变和硬度	126
	参考文献	131
第5章 固态反应		135
5.1	非合金钪的相变	135
5.1.1	多晶型	135
5.1.2	$\beta \rightarrow \alpha$ 相变的等温反应曲线和 $t-T-T$ 曲线	136
5.1.3	$\alpha \rightarrow \beta$ 相变动力学	139
5.1.4	$\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma$ 相变动力学	140
5.1.5	$\gamma \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ 相变动力学	141
5.1.6	微裂纹	142
5.1.7	热循环损伤	143

5.1.8	残留相	147
5.1.9	影响 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变速率的变量	150
5.1.10	$\beta \rightarrow \alpha$ 相变机理	152
5.1.11	非合金钪的热处理	154
5.1.12	钪的压力-温度相图	155
5.1.13	α 钪的再结晶和晶粒生长	157
5.1.14	δ 钪的自扩散	157
5.2	钪合金的相变	157
5.2.1	钪-铀合金的相变动力学	157
5.2.2	钪-锆合金的相变动力学	160
5.2.3	钪-钛合金的相变动力学	163
5.2.4	钪-镓合金的热处理	165
	参考文献	176
第 6 章	腐蚀和氧化	180
6.1	钪的一般性质	180
6.1.1	钪的特性	180
6.1.2	钪腐蚀样品的处理	181
6.1.3	钪的贮存	182
6.1.4	钪的活泼性	183
6.1.5	合金元素的标准	183
6.1.6	实验方法	184
6.2	钪及其合金的低温氧化	185
6.2.1	非合金钪的行为	185
6.2.2	合金化对大气腐蚀的影响	191
6.3	钪及其合金的高温氧化	201
6.3.1	非合金钪的行为	202
6.3.2	合金化对高温氧化的影响	212
6.3.3	稀钪合金的行为	215
6.4	钪及其合金的引燃和自燃	222
6.4.1	一般特性	222
6.4.2	非合金钪的燃烧	223
6.4.3	合金化对燃点的影响	227
6.4.4	燃烧蔓延速率	232
	参考文献	233
第 7 章	钪的合金化行为	236
7.1	实用方面	236
7.1.1	固溶体合金系	236
7.1.2	共晶合金系	237
7.1.3	偏晶合金系	237

7.1.4	高熔点金属间化合物	237
7.2	铀合金相图和晶体结构	238
7.2.1	铝-铀	239
7.2.2	锆-铀	241
7.2.3	铈-铀	242
7.2.4	钡-铀	242
7.2.5	铍-铀	242
7.2.6	铋-铀	243
7.2.7	硼-铀	244
7.2.8	钙-铀	244
7.2.9	碳-铀	244
7.2.10	铈-铀	245
7.2.11	铈-铀	247
7.2.12	铬-铀	247
7.2.13	钴-铀	247
7.2.14	铜-铀	249
7.2.15	镓-铀	250
7.2.16	锗-铀	253
7.2.17	金-铀	253
7.2.18	铪-铀	254
7.2.19	氢-铀	254
7.2.20	铟-铀	255
7.2.21	铱-铀	255
7.2.22	铁-铀	255
7.2.23	镧-铀	256
7.2.24	铅-铀	257
7.2.25	锂-铀	258
7.2.26	镁-铀	258
7.2.27	锰-铀	259
7.2.28	汞-铀	260
7.2.29	钼-铀	260
7.2.30	镎-铀	261
7.2.31	镍-铀	262
7.2.32	铈-铀	264
7.2.33	氮-铀	264
7.2.34	钨-铀	264
7.2.35	氧-铀	265
7.2.36	钨-铀	266
7.2.37	磷-铀	266

7.2.38	钾-钪	266
7.2.39	稀土元素-钪	266
7.2.40	铈-钪	266
7.2.41	铈-钪	267
7.2.42	铈-钪	267
7.2.43	钪-钪	267
7.2.44	钪-钪	268
7.2.45	铈-钪	268
7.2.46	铈-钪	268
7.2.47	银-钪	269
7.2.48	钠-钪	269
7.2.49	铈-钪	270
7.2.50	铈-钪	270
7.2.51	钪-钪	270
7.2.52	铈-钪	270
7.2.53	铈-钪	270
7.2.54	钪-钪	270
7.2.55	锡-钪	271
7.2.56	钛-钪	271
7.2.57	钨-钪	272
7.2.58	铈-钪	272
7.2.59	钪-钪	274
7.2.60	钪-钪	274
7.2.61	锌-钪	275
7.2.62	铈-钪	276
7.2.63	铈-钪	278
7.2.64	铁-钪	279
7.2.65	钪-钪	280
7.2.66	晶体结构数据一览表	285
7.3	钪合金理论	290
7.3.1	合金化元素对同素异晶体的影响	290
7.3.2	Darken 和 Gurry 预测固溶度的方法	290
7.3.3	Yao 的溶解度系数	292
7.3.4	准热力学分析	292
7.3.5	液体不互溶性	293
7.3.6	Hume-Rothery 和 Anderson 对共晶组成的分析	294
7.3.7	电子数和化合物生成	295
	参考文献	296
第 8 章	钪的难熔化合物	302
8.1	钪的氧化物	302

8.1.1	Pu-O 系中的相关系	302
8.1.2	氧化物的制备	306
8.1.3	钚的氧化物的性质	306
8.2	PuO ₂ 系	315
8.2.1	PuO ₂ -UO ₂	315
8.2.2	PuO ₂ -ThO ₂	322
8.2.3	PuO ₂ -ZrO ₂	324
8.2.4	PuO ₂ -MgO	325
8.2.5	钙钛矿型化合物	325
8.3	钚的碳化物	326
8.3.1	Pu-C 系的相关系	326
8.3.2	钚的碳化物形成	332
8.3.3	钚的碳化物性质	333
8.4	PuC 系	338
8.4.1	钚-铀-碳	338
8.4.2	PuC-TaC	347
8.4.3	PuC-ZrC	347
8.5	钚的氮化物	347
8.5.1	钚-氮系的相关系	347
8.5.2	PuN 的生成	348
8.5.3	PuN 的性质	348
8.6	钚的硅化物	349
8.6.1	硅化物的晶体学	349
8.6.2	硅化物的制备	351
8.6.3	硅化物的性质	351
8.7	钚的硫化物	352
8.7.1	钚-硫系的相关系	352
8.7.2	硫化物的制备	353
8.7.3	硫化物的性质	353
8.8	钚的氢化物	353
8.8.1	钚-氢系的相关系	353
8.8.2	氢化物的形成	354
8.8.3	氢化物的性质	354
8.9	钚的硼化物	356
8.9.1	钚-硼系的相关系	356
8.9.2	硼化物的形成	356
8.9.3	硼化物的性质	357
8.10	钚的磷化物	357
8.10.1	钚-磷系的相关系	357