

材料科学与技术丛书

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

(第10A卷)

核材料

(第I部分)

(美) B. R. T. 弗罗斯特 主编

科学出版社



TL34
F75
1

材料科学与技术丛书(第 10A 卷)

R. W. 卡恩 P. 哈森 E. J. 克雷默 主编

核 材 料

(第 I 部分)

[美] B. R. T. 弗罗斯特 主编

周邦新 等 译

科 学 出 版 社

1 9 9 9

图字：01-97-1620 号

图书在版编目 (CIP) 数据

核材料 (第 I 部分) / [美] B. R. T. 弗罗斯特主编; 周邦新等译. -北京: 科学出版社, 1999. 7
(材料科学与技术丛书: 第 10A 卷)
书名原文: Nuclear Materials Part I
ISBN 7-03-007016-X

I. 核… II. ①弗… ②周… III. ①材料科学②核能-工程材料 N. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 27547 号

0070/25

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1999 年 7 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

1999 年 7 月第一次印刷 印张: 34

印数: 1—1 700 字数: 785 000

定价: 73.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

《材料科学与技术》丛书

中文版编委会

主编

师昌绪	国家自然科学基金委员会
柯俊	北京科技大学
R. W. 卡恩	英国剑桥大学

成员 (以姓氏笔画为序)

丁道云	中南工业大学
干福熹	中国科学院上海光机研究所
叶恒强	中国科学院金属研究所
刘嘉禾	北京钢铁研究总院
朱逢吾	北京科技大学
朱鹤孙	北京理工大学
吴人洁	上海交通大学
闵乃本	南京大学
周邦新	中国核动力研究设计院
柯伟	中国科学院金属腐蚀与防护研究所
施良和	中国科学院化学研究所
郭景坤	中国科学院上海硅酸盐研究所
徐僖	四川大学
徐元森	中国科学院上海冶金研究所
黄勇	清华大学
屠海令	北京有色金属研究总院
雷廷权	哈尔滨工业大学
詹文山	中国科学院物理研究所
颜鸣皋	北京航空材料研究院

总 译 序

20 世纪 80 年代末,英国剑桥大学的 R. W. 卡恩教授、德国哥丁根大学的 P. 哈森教授和美国康乃尔大学的 E. J. 克雷默教授共同主编了《材料科学与技术》(Materials Science and Technology) 丛书。该丛书是自美国麻省理工学院于 80 年代中期编写的《材料科学与工程百科全书》(Encyclopedia of Materials Science and Engineering) 问世以来的又一部有关材料科学和技术方面的巨著。该丛书全面系统地论述了材料的形成机理、生产工艺及国际公认的科研成果,既深刻阐述了有关的基础理论,具有很高的学术水平,又密切结合生产实际,实用价值较强。

该丛书共 19 卷(23 分册),分三大部分:第 1~6 卷主要阐述材料科学的基础理论;第 7~14 卷重点介绍材料的基本性能及实际应用;第 15~19 卷则着重论述材料的最新加工方法和工艺。

该丛书覆盖了现代材料科学的各个领域,系统而深入地对材料科学和技术的各个方面进行了精辟的论述,并附以大量图表加以说明,使其内容更加全面、翔实,论述也比较严谨、简洁。

有 400 余名国际知名学者、相关领域的学术带头人主持或参加了该丛书的撰写工作,从而使该丛书具有很高的权威性和知名度。

该丛书各卷都附有大量参考文献,从而为科技工作者进一步深入探讨提供了便利。

随着我国科学技术的飞速发展,我国从事与材料有关研究的科技人员约占全部科技人员的 1/3,国内现有的有关材料科学方面的著作远远满足不了广大科技人员的需求。因此,把该丛书译成中文出版,不但适应我国国情,可以满足广大科技人员的需要,而且必将促进我国材料科学技术的发展。

基于此,几年前我们就倡议购买该丛书的版权。科学出版社与德国 VCH 出版社经过谈判,于 1996 年 10 月达成协议,该丛书的中文版由科学出版社独家出版。

为使该丛书中文版尽快与广大读者见面,我们成立了以师昌绪、柯俊、R. W. 卡恩为主编,各分卷主编为编委的中文版编委会。为保证翻译质量,各卷均由国内在本领域学术造诣较深的教授或研究员主持有关内容的翻译与审核工作。

本丛书的出版与中国科学院郭传杰研究员的帮助和支持是分不开的,他作为长期从事材料科学研究的学者,十分理解出版本丛书的重大意义,购买本

丛书版权的经费问题就是在他的大力协助下解决的，特此对他表示感谢。另外，本丛书中文版的翻译稿酬由各卷主编自筹，或出自有关课题组和单位，我们对他们给予的支持和帮助表示衷心的感谢。

我们还要感谢中国科学院外籍院士、英国皇家学会会员 R. W. 卡恩教授，他以对中国人民的诚挚友谊和对我国材料科学发展的深切关怀，为达成版权协议做出了很大努力。

材料是国民经济发展、国力增强的重要基础，它关系着民族复兴的大业。最近几年，我国传统材料的技术改造，以及新型材料的研究正在蓬勃展开。为适应这一形势，国内科技界尽管编著出版了不少材料科学技术方面的丛书、工具书等，有的已具有较高水平，但由于这一领域的广泛性和迅速发展，这些努力还是不能满足科技工作者进一步提高的迫切要求，以及我国生产和研究工作的需要。他山之石，可以攻玉。在我国造诣较深的学者的共同努力下，众煦漂山，集腋成裘，将这套代表当代科技发展水平的大型丛书译成中文。我们相信，本丛书的出版，必将得到我国广大材料科技工作者的热烈欢迎。

为了使本丛书尽快问世，原著插图中的英文说明一律未译，各卷索引仍引用原著的页码，这些页码大致标注在与译文相应的位置上，以备核查。

由于本丛书内容丰富，涉及多门学科，加之受时间所限，故译文中难免存在疏漏及不足之处，请读者指正。

师昌绪

柯俊

1998年3月于北京

丛书序

材料是多种多样的,如金属、陶瓷、电子材料、塑料和复合材料,它们在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都惊人地相似。诸如相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁锢、原子聚集体的统计力学或磁自旋等的概念,不仅用来说明最早研究过的单个材料的行为,而且也用来说明初看起来毫不相干的其它材料的行为。

正是由于各材料之间相互有机联系而诞生的材料科学,现在已成为一门独立的学科以及各组成学科的聚集体。这本新的丛书就是企图阐明这一新学科的现状,定义它的性质和范围,以及对它的主要组成论题提供一个综合的概述。

材料技术(有时称材料工程)更注重实际。材料技术与材料科学相互补充,主要论及材料的工艺。目前,它已变成一门极复杂的技艺,特别是对新的学科诸如半导体、聚合物和先进陶瓷(事实上对古老的材料)也是如此。于是读者会发现,现代钢铁的冶炼与工艺已远超越古老的经验操作了。

当然,其它的书籍中也会论及这些题目,它们往往来自百科全书、年报、专题文章和期刊的个别评论之中。这些内容主要是供专家(或想成为专家的人)阅读。我们的目的并非是贬低同行们在材料科学与技术方面的这些资料,而是想创立自己的丛书,以便放在手边经常参考或系统阅读;同时我们尽力加快出版,以保证先出的几卷与后出的几卷在时效方面有所衔接。个别的章节是较之百科全书和综述文章讨论得更为详细,而较之专题文章为简略。

本丛书直接面向的广大读者,不仅包括材料科学工作者和工程师,而且也针对活跃在其它学科诸如固体物理、固体化学、冶金学、建筑工程、电气工程和电子学、能源技术、聚合物科学与工程的人们。

本丛书的分类主要基于材料的类型和工艺模式,有些卷着眼于应用(核材料、生物材料),有些卷则偏重于性能(相变、表征、塑性变形和断裂)。有些题材的不同方面有时会被安排在两卷或多卷中,而有些题材则集中于一专卷内(如有关腐蚀的论述就是编在第7卷的一章中,有关粘结的论述则是编在第12卷的一章中)。编者特别注意卷内与卷间的相互引证。作为一个整体,本丛书完成时将刊出一卷累积的索引,以便查阅。

我们非常感谢 VCH 出版社的编辑和生产人员,他们为收集资料并最后出

书,对这样繁重的任务作出了大量而又高效的贡献。对编辑方的 Peter Gregory 博士和 Deborah Hollis 博士、生产方的 Hans-Jochen Schmitt 经济学工程师表示我们的特别谢意。我们亦感谢 VCH 出版社的经理们对我们的信任和坚定的支持。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

P. 哈森 (Göttingen)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

我们的朋友和主编 P. 哈森教授,在今年五月份生病,并于 10 月 18 日在哥丁根 (Göttingen) 逝世,时年 66 岁。直到临终的最后一段时间,由于意志的驱使和对科学的热爱,他一直从事与我们合作的事业和参与有关的编辑工作。他的逝世对他的深为他热爱的家庭,他的同事们,他的教会,以及对全世界与他有密切联系的、从事金属物理和物理冶金方面研究的同行们是巨大的损失。

哈森博士为哥丁根大学的金属物理教授逾 30 年,直到近来退休,他的名字传遍了大西洋两岸。在他的祖国,他智慧的箴言,在公众界和学生间将会留下巨大的影响。他是《金属材料杂志》(Zeitschrift für Metallkunde) 的编辑,曾是哥丁根艺术与科学院 (Göttingen Academy of Arts and Sciences) 主席,Deutsche Gesellschaft für Metallkunde 理事会的中心人物,欧洲科学院院士,美国工程院院士。

1986 年,他首先倡议而最终导致出版《材料科学与技术》丛书前 18 卷,他亲自编著的关于相变方面的第 5 卷《材料的相变》于 1991 年出版,并获赞誉。我们感谢他对这一伟大事业的贡献,并以成功地完成这一事业作为对他的纪念。

R. W. 卡恩 (Cambridge)

E. J. 克雷默 (Ithaca)

1993 年 10 月

前 言

核材料是材料科学与工程中比较新而特殊的一门学科。虽然自开创世界以来,天然放射性就已影响到材料,但它只是在第二次世界大战中原子弹的开发以及后来将该技术改为民用后,人们才产生了对核材料,或更确切地说,就是在核技术中使用的并且是在独特环境中工作的材料进行了解的需求。

真正独特的核材料是锕系元素,其中铀和钚存在于自然界中,其它的则是通过中子轰击而产生。具有奇数同位数的锕系元素可以裂变,产生一系列强放射性的裂变产物。在反应堆使用过的大部分常规材料含有锕系元素和它们的裂变产物,锆是一个例外。压水堆(PWR)促进了锆的冶金学发展是显而易见的。这些常规材料在服役期间受到强烈的辐照。裂变产生的快中子轰击固体会使原子离位。当这些中子减慢速度后而被俘获又会产生放射性物种。在聚变反应堆中,堆容器受到快中子和离子化气体的轰击。

研究不同形式的辐照与核材料间的各种反应,一方面促进了作为固体物理的研究,另一方面则促进了作为材料工程的研究。仅仅是在近些年,主要是通过采用先进技术的计算机模型来描述部件性能的开发工作,才使这两个完全不同的学科结合在一起。这些模型只需要输入描述应力产生、蠕变、气泡形成、原子迁移等的基本数据或方程就可以了。

最后,一个务必不能忽视的问题就是如何处理堆内产生的裂变产物和其它放射性物种;这是在近20年里对核动力的普及到衰退产生影响而未能处理好的问题。

第10卷中有两部分用来描述核材料的认识水平和当代实际事件来龙去脉的相关现象。因此,第1章主要讨论金属燃料,但并不排除讨论其它燃料,文中引入了一体化快中子反应堆——一种新的设计原理,用来对待废物处置以及防止核扩散的问题。第2章论述弥散型燃料,这是一种为了抑制在高裂变速率运行时燃料肿胀以及改善安全性的想法,将燃料弥散在结构或慢化材料基体中。这种燃料被广泛用于研究堆、小型轻便堆,以及高温气冷堆设计中。

二氧化铀是世界上商用反应堆(以及潜艇反应堆)的主要燃料。数百万计的 UO_2 芯块已在反应堆内被辐照并且运行良好。在第3章中描述这种燃料。它的陶瓷相关物,主要是碳化物和氮化物将在第4章讨论。

在二次世界大战后,迅速发展的大多数反应堆涉及到气冷石墨慢化系统。直到70年代,英国和法国的规划一直是建设这种反应堆,而且许多堆仍在运行。石墨存在某些独特的材料问题,例如:Wigner潜能,这导致了在1957年

Windscale 堆上的一次严重事故。第 5 章论述石墨和其它慢化剂，包括最通用的水。

核燃料的第一级容器是包壳，通常为圆形管。该包壳的性能对反应堆工业的成功至关重要，而事实上这已是反应堆工业的成就之一。这在第 6 章即第 I 部分的最后一章中论述。第 II 部分的第 1 章继续讨论第 6 章的题目，但专门讨论锆合金。反应堆的第二道防线是压力容器，通常为一巨大的焊接钢结构。此外，这种压力容器会出现特殊问题，最显著的就是中子辐照对脆性到延性转变温度的影响。第 8 章描述结构材料。为了圆满结束对非燃料材料的讨论，应该安排包括有关屏蔽和控制材料的章节。但很遗憾，在这领域内的专家如此之少，这一章的内容不得不去掉，如果将来要再版第 10 卷 (A, B)，将尽力确保它们包括有这样的章节。

为了对前几章提供一个基础材料，第 9 章从固体物理学家的观点描述有关固体——主要是金属的辐照效应的认识现状。顺便提一下，应该注意的是这个认识在电子和离子注入领域中具有重要的应用，这些分别在该丛书的第 4 卷和第 15 卷中论述。

第 10 章讨论目前关于聚变堆第一壁和再生区材料问题的一些设想。聚变反应堆研究与开发已持续了 30 多年，但要达到商业应用，还得 10 年左右。然而，材料问题已明确并且解决它们的办法主要凭借在其它章节中描述的裂变堆知识和经验。

第 II 部分的第 11 章主要集中在工程上并且是用来告诉读者，工程师如何应用在其它章节中描述的知识。书中选编了增殖反应堆技术是因为它的实践者们有时间和远见去发展和采用先进技术的设计编程和方法。

核废物有效处置的重要性早已被论述。第 12 章描述安全处理核废物，尤其是从商业堆芯产生的废物目前的工艺水平。

显然，核材料不是一门孤立的学科。它的所有题目与其它卷中描述的论题相关：例如，使用加工陶瓷燃料的技术参考了在第 17 卷中的关于陶瓷加工的理论知识，离子注入（辐照损伤的一种形式）在第 15 卷中已有详细的阐述，而对了解辐照损伤起决定性的点缺陷行为则在第 1 卷中作了相关的论述。鼓励读者去查阅上述章节。

B. R. T. 弗罗斯特

Argonne, 1994 年 1 月

目 录

历史概述.....	(1)
1 快堆金属燃料	(3)
2 弥散燃料	(43)
3 氧化物燃料	(100)
4 非氧化物陶瓷核燃料	(180)
5 核反应堆慢化材料	(338)
6 液态金属反应堆中包壳和结构钢的辐照性能	(384)
索引.....	(498)

历史概述

(赵文金 译 周邦新 校)

核动力已享有时代盛名。继二次世界大战结束后的 20 年里,核动力迅猛发展而且被认为是无限的廉价电力源泉。国际上用许多不同类型的反应堆,包括采用不同的燃料、慢化剂、冷却剂和中子谱的各种反应堆所做的实验。英国和法国追求石墨慢化气冷堆作为快速而廉价生产钚和电的途径。在英国,Magnox 和先进气冷堆(AGR)系统仍然为国家提供全部核电。法国在 70 年代下决心放弃了气冷而转为压水反应堆(PWR)型,现在,法国总电量的 75%都是由 PWR 提供。英国直到 1985 年明显发现 AGR 系统具有缺陷时才采取了措施。在这些发展过程中,燃料类型从金属变到氧化物。Magnox 和法国气冷堆用金属燃料,但是为了达到高燃耗,AGR 以及美国类似的 AGR 选用二氧化铀,尽管燃料的富集要花费代价。

在美国,生产堆是采用水冷以及由石墨或重水慢化。美国不同于前苏联和加拿大,决定不用这种堆生产电。以 Admiral Rickover 领导的潜艇反应堆规划大大地推动了美国动力堆的设计,它选择压水系统;起初它用金属燃料但不久就换成了氧化物燃料。在 Shippingport 建造了这种 PWR 的民用型,并且形成了除通用电气公司外的所有美国反应堆公司都愿意选择作为发展商业堆型的概念,这已在全球范围内获得了巨大成功。

通用电气公司开发的沸水堆或 BWR,在该堆中保持较低的压力以使一回路冷却剂沸腾。虽然该系统也享有成功之誉,但不如 PWR 广泛。1965 年建立了一个模式堆,选择了 UO_2 燃料,包壳用锆合金以及冷却剂为轻水。

美国潜艇反应堆计划的另一个任务是开发弥散燃料。高中子注量率试验堆的需要而导致了板型燃料的发展,燃料板是由 UAl_3 或 UO_2 颗粒弥散在铝或钢基体中组成。这种燃料仍然是全世界研究和试验堆的“挑大梁者”(workhorse)。

在 50 年代后期,Peter Fortescue 和其他研究者提出了将燃料颗粒弥散在石墨基体中并且用氦气冷却的设计思想。这就是从此称为的高温气冷堆(HTGR)。General Atomics (GA)承担商用 HTGR 的开发,继之以欧洲国际性协议在英国的 Winfrith 建造了 Dragon 试验堆,GA 在 Peach Bottom 建造了一个小型动力堆,再加上在 Colorado 的 Fort St Vrain 的工厂装置。德国和日本实施了他们自己的 HTGR 计划;在日本,对高温加热处理过的气体以用于炼钢和其它非动力过程中有着浓厚兴趣。虽然对 HTGR 工作仍在进行,但步伐却大大放慢了。

虽然慢化系统允许使用低富集度燃料而且显然是十分安全,但快中子谱(未被慢化)堆提供了一个更诱人的前景。从 ^{238}U 增殖钚的能力,在某种意义上可产生比反应堆消耗燃料还多的新燃料。这将大大地扩大了世界的核燃料资源并且避免了对富集铀加工厂的需求。在二次世界大战后不久便开始了增殖反应堆的研究工作,并且在 Idaho 的 Argonne 国立实验室于 1951 年建成了试验增殖堆 I 或 EBR-I,用液态钠冷却和装有高度富集的金

属铀燃料。它发出了电,这是世界上第一座这样做的反应堆。世界上关于快中子增殖反应堆的发展仍在继续而且许多已被建成,最著名的是法国的超凤凰(superphénix)堆,发电量为 1100MWe。世界上大多数快堆用二氧化铀钚 $[(U,Pu)O_2]$ 作为燃料,用 UO_2 作再生区材料来增殖钚,并且用液态钠作为冷却剂。在英国和美国的试验已证明这种堆很安全:冷却泵被关闭后,钠的自然循环能排除堆芯的热。在第 1 章所讨论的新的研究情况已导致美国快堆计划的新动向(也可以说是相当老的),其目的在于考虑安全性以及防护措施而不只是增殖。这样,液态金属快中子增殖堆或 LMFBR 这种名称在美国不再流行;它已被更简化的液态金属反应堆或 LMR 代替,在本卷中美国作者普遍应用了这一名称。

80 年代几乎决定了反应堆进一步发展的命运,起初是因为在工业界显然忽略了安全处理废物的问题,而后来又因为 1979 年在 Three Mile Island(三哩岛)以及 1986 年在 Chernobyl(切尔诺贝利)发生的两起反应堆事故。这些事故已被彻底地分析并且从中得到的经验已被用于改善反应堆的运行。目前,在 90 年代,另一个因素开始起作用:由燃烧矿物燃料排出的废物而引起了全球正在变暖,这可能会导致从燃煤和燃油发电站转向核电站。通过这样一个变化,酸雨现象也能得到改善。核工业的设计已标准化,废物的安全处理已取得了进展,并且正在更彻底地培训它的操作人员。

也许对改进反应堆材料性能方面的成功未给予充分赞扬。PWRs 的燃料元件达到了在 10 年前梦想不到的燃耗水平,而且具有非常低的损坏率。压力壳的完整性已被充分地研究:这是英国决定购买 PWR 系统的关键所在,并且是材料专业的精英们得出的结论。

不安的是由于工作人员进入退休期,以及该领域还未出现灿烂前景,因此只有少数人选择这个工作,使得核材料领域的人才和知识受到影响。在这种情况下采用新的办法,利用大量文献资料汇集成丰富的知识并易于查找就显得尤其重要。我希望本卷将对这方面的需求作出贡献,并且在这挑战性的领域中激励起更大的兴趣。

作为该卷补充和完善的参考文献还有:

Glasstone, S., Sesonske, A. (1981), Nuclear Reactor Engineering. New York: Van Nostrand.

Roberts, J. T. A. (1981), Structural Materials in Nuclear Power Systems. New York: Plenum Press.

Simnad, M. (1971), Fuel Element Experience in Nuclear power Reactor. New York: Gordon and Breach.

Olander, D. (1976), Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements. Oak Ridge: US Atomic Energy Commission report TID-26711.

Frost, B. (1982), Nuclear Fuel Elements. Oxford: Pergamon.

Thompson, M. W. (1969), Defects and Radiation Damage. Cambridge: Cambridge University Press.

Gittus, J. (1978), Irradiation Effects in Crystalline Solids. London: Applied Science Publishers.

B. R. T. 弗罗斯特

1 快堆金属燃料

Gerard L. Hofman and Leon C. Walters

Argonne National Laboratory, U. S. Department of Energy, Idaho Falls, ID, U. S. A.

(周邦新 译 应诗浩 校)

目录

1.1 概述	5
1.2 燃料行为	9
1.2.1 肿胀和气体释放	9
1.2.1.1 铀	9
1.2.1.2 铀-钚	13
1.2.1.3 与非裂变组元组成的合金	13
1.2.1.4 液态金属冷却快堆的燃料	15
1.2.2 燃料-包壳相互作用	23
1.2.2.1 燃料-包壳机械相互作用	23
1.2.2.2 燃料-包壳化学相互作用	28
1.2.3 瞬态试验	36
1.2.4 包壳有破口的燃料元件运行	37
1.3 致谢	40
1.4 参考文献	41

符号与缩语表

D	扩散率
D_i	迁移溶质的扩散率 (均匀溶液中的 i 组元)
ΔH_i	溶液中 i 组元的偏克分子热焓
J_i	均匀溶液中 i 组元的溶质流
N_i	迁移溶质的浓度 (均匀溶液中的 i 组元)
P_i	内部气体压力
P_{ex}	外压
Q^*	传递的热
Q_e	Q^* 中由电子“气”(wind)引起的传热组分
Q_p	Q^* 中由声子“气”(wind)引起的传热组分

Q_{in}	Q^* 中的本征传热组分
r	气泡半径
R	气体常数
T	温度
γ	气泡表面张力
AEC	美国原子能委员会
ANL	Argonne National Laboratory
BOL	寿命起始
Bu	燃耗
CP-5	Chicago pile no. 5 反应堆
CRBR	Clinch River 增殖反应堆
DFR	Dounreay 快堆
DN	缓发中子
DPH	金刚石棱锥体硬度
EBR- I , II	实验增殖堆 I , II
FCCI	燃料-包壳化学相互作用
FCMI	燃料-包壳机械相互作用
FERMI	费米快堆
FPINZ	燃料行为模拟程序(瞬态)(ANL)
hex	六方形
IFR	一体化快堆
LIFE-METAL	燃料行为模拟程序(ANL)
LMR	液态金属冷却的快堆
MK-IA, II	I A, II 型 EBR- II 燃料元件
RBCB	包壳破损后的运行
SEM	扫描电子显微镜
TOP	瞬态超功率
TREAT	瞬态反应堆试验装置

1.1 概 述

虽然金属燃料是液态金属冷却快堆(LMR)的第一代燃料,但在 60 年代后期,当金属燃料的潜力还没有完全发挥以前,世界范围的兴趣转向了陶瓷 LMR 燃料。然而,在 Argonne National Laboratory 的实验增殖堆 II (EBR- II)上,整个 70 年代都在进行金属燃料的发展工作,EBR- II 继续使用金属铀-钍合金燃料:U-5Fs*。这 10 年来,在 EBR- II 上满意地解决了金属燃料性能的局限性,事实上还发现了金属燃料的其它特性。最近对以前及整个 70 年代开发工作所取得的结果进行了评述(Walters 等,1984)*。

在 80 年代开始,尽管金属燃料显得很有前途,但在发展 LMR 时仍处于第二种选择。但是,80 年代初的一系列事件引起了对反应堆技术的重新评估,包括 LMR 和与之相关的燃料循环。美国 Clinch River 增殖堆(CRBR)的取消成为这种重新评估必要性的预兆,后来的事件又增强了这种必要性。从纯经济的观点来看,CRBR 和燃料循环存在严重的问题。由几个 LMR 支撑的处于中心地位的燃料处理工厂十分庞大,当它的费用和内在原理性的问题充分明朗化后,这样一个计划的需求就烟消云散了。此外,Three-Mile Island(三哩岛)和 Chernobyl(切尔诺贝利)事故提出了需要一种先进的反应堆概念,能显示出比目前一代的任何反应堆都更安全。最后,对环境保护日益增长的关心引起了对放射性废物处理已有方法的重新审查。

1983 年,一种称为一体化快堆的概念(IFR)在 Argonne National Laboratory (ANL)形成,其目的是提供一种既安全又经济的方法,解决那些妨碍核动力充分成为世界能源需求的技术和制度方面的问题(Till 和 Chang,1988;Chang,1989)。这个概念的中心是重视世界上 ^{238}U 的储量必需作为下世纪的能源被利用起来。这样,燃料系统必须包含由辐照 ^{238}U 得到的钍,反应堆必须有好的增殖特性。对一体化概念来说,金属燃料看来是最适合的后选者,在 60 年代后期发展起来的 U-Pu-Zr 体系是从另外一些金属燃料体系中挑选出来的,特别是因为它有优良性能的特点。

在 1983 年以前,金属燃料极好的增殖性能和达到高燃耗的潜力已被承认。在 IFR 概念的阐述中认识到的金属燃料其它一些特性,使金属燃料更具有吸引力。

首先,金属燃料比氧化物燃料的热导高,安全方面有非常明显的好处(Cahalan 等,1985;Marchaterre 等,1985,1986;Wade 和 Chang,1988)。这些有利之处在 EBR- II 上已被演示过:一个试验是从满功率时切断一次流量,另一个是热阱试验,在没有紧急停堆的情况下,反应堆在没有人员和机械的干预下自动停堆(Mohr 等,1987;Feldman 等,1987;Planchon 等,1987)。

• p. 4 •

*钍是裂变产生各种元素的一种平衡浓度,是 EBR- II 火冶金回收燃料循环中残留的几种元素,包括 2.5wt% 钍,1.9wt% 钒,0.3wt% 铈,0.2wt% 钡,0.1wt% 锆和 0.01wt% 铌。

1) 为原著页码,下同。——译者注

第二方面,通过一种新型的并包含几种固有好处的工艺方法,金属燃料适合于直接回收处理。在金属燃料回收处理中的关键步骤是电解精炼(Burris,1986;Burris 等 1984,1986)。阴极产物包含着铀、钚和少量锕系元素,还有相当多的剩余裂变产物,使得阴极产物有很强的放射性。但是,裂变产物能够被充分地分离,以满足回收的反应堆燃料的核性能需要。因为含有裂变产物使得燃料的放射性很强,所有的回收和重新加工的步骤都在热室中远距离操作。这种回收工艺带来了多种好处。首先,由于材料的强放射性,燃料的转移是不可能的;而且,阴极产物保持着合金状态,同时还有放射性,这种过程使得核武器的扩散不可能实行。第二,这个过程包含了分批的操作,这样,容易改变规模以符合局部的或增涨的反应堆需求;另外,比价分析表明,这个过程与其它后处理方法相比,非常有竞争力。最后,也许是最重要的,这种回收方案使得所有锕系元素基本上能保留在燃料循环中,通过加工返回到燃料棒中,参与裂变而产生有用的能量(Chang,1989)。作为一个结果,从这种过程形成的高放废物仅在数百年中衰变至本底,而不是百万年后。

通过上述讨论的一些优点,金属燃料提供了解决 LMR 中固有的一些技术上或原理上问题的方法。然而,整个 IFR 概念的可行性,包括安全、燃料回收和燃料性能还需要论证。一个积极的研究计划在 1984 年开始,以证明 IFR 概念所有方面商用化的可行性,包括 U-Pu-Zr 金属燃料能够满足所有 IFR 概念要求的演示。下面将总结特殊选择 U-Pu-Zr 合金的合理性,以及对为什么金属燃料能达到高能耗的设计目标进行解释。显然,以²³⁸U 为增殖材料的增殖反应堆需要含钚的燃料;但是,钚和铀-钚合金的固相线温度低,使得实际反应堆的设计成为不可能。因此,寻求添加合金元素以提高 U-Pu 合金的固相线温度。在这系统中能形成合金的几种元素都探索过,铬、钼、钛和锆都可以使 U-Pu 合金的固相线温度提高到符合需要,并且合金中的钚含量在满足需要的范围内。但是锆是唯一最好的,因为它可以抑制燃料和包壳间的相互扩散,改善燃料与不锈钢包壳材料间的相容性(Walter 等,1975)。没有锆存在时,包壳中的镍和铁容易扩散到燃料中,在包壳相邻处形成固相线温度低的物质成分。当发生异常事件时,一旦燃料-包壳界面处的温度超过该处物质的固相线温度时,由于液态物质的渗透会引起包壳的破坏。在钚含量不超过 20wt% 的 U-Pu-Zr 合金中,锆的允许含量限制在大约 10wt%,这是因为太多的锆会引起液相线温度的提高,以至超过制造金属燃料时射铸技术所用的熔凝石英模管的软化点(Tracy 等,1989)。在 60 年代末期,钚基燃料合金得到了部份发展,这种合金具有高的固相线温度,并与包壳的相容性能满足要求。

• p. 5 •

然而,提高固相线温度仅解决了难点中的一部分。金属燃料中已觉察到的另一个问题是,增加反应堆中停留时间的可实现性或者达到高能耗的可能性,直到 60 年代末还未得到完全验证。一种简单的设计改变就能使金属燃料达到高能耗(Hofman,1980)。初次用在快堆 EBR-I, EBR-II, FERMI 和 DFR 中的金属燃料是通常所说的高有效密度(85%—100%),燃料与包壳之间只有很小的或者没有间隙。名词“有效密度”通常是用来考核包壳内燃料的有效密度,用燃料理论平面密度除以包壳内平面尺寸进行计算。低的有效密度能够用高孔隙率燃料或者燃料与包壳之间的大间隙,或者两者同时采用的办法获得。当裂变产物积累至燃料发生肿胀时,包壳在低燃耗时发生变形导致破损。在那时,为加深燃耗尝试的方法集中在燃料的合金化和热机械处理以抑制肿胀,以及用增强的包壳以便在燃料

• 6 •