

**CARBON AND GRAPHITE MATERIALS
IN NUCLEAR ENGINEERING**
核工程中的炭和石墨材料

徐世江 康飞宇 编著

清华大学出版社

**CARBON AND GRAPHITE MATERIALS
IN NUCLEAR ENGINEERING**

核工程中的炭和石墨材料

徐世江 康飞宇 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书通俗地介绍了核工程用炭和石墨材料的基本理论和应用,包括生产工艺,检测技术与标准,计算模拟方法。第1章简要地介绍了核石墨在人类驯服核能过程中的贡献及在第四代核反应堆重要候选堆型之一——高温气冷堆中的应用。第2章简要介绍核反应堆的基础知识。第3章介绍高温气冷堆发展概况,炭与石墨材料在高温气冷堆中的作用和地位。第4~6章介绍炭、石墨材料的基础知识,生产工艺和辐照前的性能。第7章介绍核石墨的辐照效应:辐照引起的结构和与结构有关的性质的变化、辐照试验和辐照后性能变化的测试。和核纯一样,辐照效应是核石墨特有的问题。第8章是对新的环境下核石墨进一步研发的一些看法。第9章介绍炭、石墨材料在核聚变堆面向等离子体材料中应用的潜力和限制。

本书意图在高温气冷堆产业化的过程中,在从事核石墨及核用炭材料研发的炭、石墨材料界的科技和工程技术人员与核工程设计领域的科技和工程技术人员之间起沟通作用。本书也可作为相关专业的高等院校本科生和研究生的参考书籍。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

核工程中的炭和石墨材料/徐世江,康飞宇编著.--北京:清华大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-302-24508-7

I. ①核… II. ①徐… ②康… III. ①核工程—碳素材料 ②核石墨
IV. ①TL34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 252109 号

责任编辑:宋成斌

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:160×230 印 张:19.5 插 页:3 字 数:327千字

版 次:2010年12月第1版 印 次:2010年12月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:50.00元

能源是人类生存和发展的基础。随着人口数量的增加和生活水平的提高,化石燃料的消耗正以前所未有的速度进行,化石燃料的枯竭已不是遥远的事情;大量消耗化石燃料所排放的温室气体,对人类的生存环境构成威胁。为了人类社会和经济的可持续发展,发展低碳能源已迫在眉睫。核能是一种低碳能源。理论上,聚变能的利用可以较长远地解决人类的能源供应问题,但核聚变能开发利用技术的研发还有很长的一段路要走,赶不上人类对能源的迫切需求。经过半个多世纪的研发,核裂变能的利用技术已经成熟,成本上已可与火电竞争。目前世界上有 430 多座核反应堆在运行,核电的份额已达全世界电力的 16% 左右,有些国家,如法国,约 80% 的电力来自核电。目前核裂变能是唯一能以较大规模经济地替代化石燃料的能源。

发展核电对我国具有特殊的意义。我国能源产地和能源消耗地严重失衡,大规模运输增加了本来已经负荷沉重的交通运输系统的压力。2008 年初的雪灾表明,电力输送和煤炭输运一样存在巨大的风险。发展核电可以缓解化石燃料长途输运的压力;发展配置灵活的中、小型核电站,借以免除电力远距离输送问题。

核电站排放的温室气体与水电站相当,对环境友好。核电的事故几率远低于其他工业的事故几率,但一旦发生重大事故,后果严重,影响深远。为了全面地改善核电站的性能,特别是安全性能,国际上正在研发第四代核反应堆,这种反应堆的安全不是建立在核电工业中采用的传统的工程安全措施上,而是建立在物理原理上,使其具有固有安全性。

高温气冷模块堆就是这种具有固有安全、配置灵活的核反应堆,是第四代核反应堆的候选堆型之一。我国在建成和成功地运行了 10MW 高温气冷模块试验堆后,正在设计、建造一座 200MW 的商用示范堆。

石墨是高温气冷堆赖以建立的三大物质基础之一,我国目前还不能生产用于高温气冷堆的石墨,200MW 示范堆急需的石墨还不得不依赖进口。为了独立自主地发展具有自主产权的高温气冷堆产业,核石墨研发必须尽

快提上日程,国内石墨界有识之士正在酝酿组织力量开展核石墨的研发工作,本书就是在这种背景下编写的,其目的是为从事石墨材料研发的科技、工程技术人员介绍核工程方面的基本知识、石墨在高温气冷堆中的应用、快中子辐照引起石墨结构和性能的变化、核石墨研发应解决的主要问题;为核工程研发、设计和建造的科技和工程技术人员介绍石墨材料的结构特征、应用潜力和限制,核石墨研发影响因素多,研发周期长的特点。高温气冷堆产业的发展需要核工程领域和石墨材料研发生产领域的科技、工程技术人员的紧密合作,希望本书在这一合作中能起沟通作用。

核石墨的发展已经有半个多世纪,Nightingale 在《核石墨》一书中对气冷堆用石墨作了全面的总结;Delle,Koizlik 和 Nickel 在《炭、石墨材料在核工程中的应用》中总结了高温气冷堆用石墨研发的成果。从上世纪 80 年代末开始,核石墨的研发停顿了约十年,目前仍处于恢复阶段,本书以上述两书为基础,结合新的研究成果和新提出的需求编写而成。本书阐明核石墨基本问题的图表主要取自上述文献,只在必要时才使用其他文献,以便对核石墨的基本知识有兴趣的读者需要进一步了解时,不必查阅浩瀚的原始文献。其他文献选择原则与此相同。

核石墨的研发,特别是在对可持续发展和核安全提出越来越高要求的新形势下,还有很多问题需要解决,本书虽然作了一些分析,但由于作者知识所限,本书阐述的内容难免遗漏、不当甚至错误之处,对读者的批评指正,将不胜感谢。

本书的第 4~6 章由康飞宇执笔。其余章节由徐世江执笔。

本书的编写得到清华大学核能技术设计研究院的支持,特别是得到德国于利希研究中心 H. Nickel 教授和 K. Kugeler 教授的帮助。该中心的前身是于利希核研究中心,专门从事高温气冷堆技术的研发,Nickel 教授曾任该中心反应堆材料研究所所长、亚琛大学教授、德国反应堆安全委员会主席,为了本书的编写,特安排作者之一赴德国讨论编写内容,收集材料,解决一些引用材料的版权问题。Kugeler 教授是该研究中心反应堆和核安全研究所所长、亚琛大学教授,资助了赴德访问的费用,并为本书第 2 章和第 3 章提供了大量资料。作者在此对他们表示衷心的感谢。清华大学核能技术设计研究院于溯源教授全力支持了本书的编写;经荣清教授审校了本书第 1, 2, 3 章,作者由衷地感谢他们的热忱帮助。

作 者

2010 年 12 月



CONTENTS

第 1 章 概论	1
1.1 核能发展简介	1
1.2 核反应堆的分类	3
1.3 炭、石墨材料在核工程中的应用	3
1.4 核石墨发展概况	5
参考文献	9
第 2 章 核反应堆基础知识	10
2.1 中子与原子核的反应和反应截面	10
2.1.1 核裂变反应	10
2.1.2 中子俘获反应	12
2.1.3 中子散射	13
2.1.4 中子倍增	13
2.1.5 核反应截面	13
2.2 自持核链式反应的条件	14
2.3 中子慢化	17
2.3.1 中子慢化原理	17
2.3.2 慢化剂的特性参数	20
2.4 核电站简介	21
2.4.1 核反应堆堆芯	21
2.4.2 核反应堆一回路和冷却剂	24
2.4.3 慢化剂和反射层	25
2.4.4 反应堆控制系统	25
2.4.5 反应堆安全防护系统	26
2.4.6 乏燃料元件储存系统	26



参考文献	27
第3章 高温气冷堆	28
3.1 高温气冷堆发展概况	28
3.2 高温气冷堆简介	29
3.2.1 球床高温气冷堆	30
3.2.2 柱状高温气冷堆	37
3.3 高温气冷堆燃料元件	38
3.4 高温气冷球床堆堆内构件	45
3.4.1 堆内构件的功能	45
3.4.2 堆内构件的结构	45
3.4.3 堆内构件的负荷	50
3.5 高温气冷模块堆——第四代核反应堆的候选堆型之一	53
参考文献	57
第4章 炭、石墨的结构	59
4.1 碳的原子结合方式及其同素异构体	59
4.1.1 碳元素的特点	59
4.1.2 碳的同素异构体	60
4.2 炭、石墨材料的多样性及相互转化	66
4.2.1 碳的相图	66
4.2.2 炭材料的多样性	68
4.2.3 炭纳米结构的多样性	68
4.2.4 易石墨化炭和难石墨化炭	69
4.2.5 富勒烯的转化	70
4.3 石墨的结构	71
4.3.1 石墨的结构类型	71
4.3.2 石墨晶体结构参数	72
4.3.3 石墨化度 G	73
4.3.4 石墨化机理	74
4.3.5 均质石墨化与异质石墨化	75
4.4 炭、石墨材料特性的表征方法	76
4.4.1 X射线衍射	76

4.4.2 拉曼光谱分析	77
4.4.3 透射电镜和高分辨透射电镜	78
4.4.4 扫描隧道显微镜	79
4.4.5 扫描电镜	79
4.4.6 石墨的孔隙率	81
参考文献	83
第 5 章 石墨材料的生产	84
5.1 天然石墨	84
5.1.1 天然石墨的种类及资源分布	84
5.1.2 天然鳞片石墨的开采	86
5.1.3 天然鳞片石墨的提纯	86
5.2 人造石墨	88
5.2.1 核石墨的制备	88
5.2.2 各向同性核石墨的生产	115
5.3 核石墨生产的质量保证	117
参考文献	118
第 6 章 石墨的性能	120
6.1 石墨的物理性能	120
6.1.1 基本物性数据	120
6.1.2 密度	121
6.1.3 孔隙率和渗透性	121
6.1.4 热膨胀系数	122
6.1.5 比热容和热导率	123
6.1.6 电阻率	124
6.2 石墨的机械性能	125
6.2.1 弹性模量	125
6.2.2 强度	126
6.2.3 断裂和疲劳	127
6.2.4 蠕变	128
6.3 石墨的化学性能	130
6.3.1 高温氧化及气化反应	130



6.3.2	与金属、非金属及其氧化物的反应	130
6.3.3	形成层间化合物	132
6.3.4	石墨与强氧化性的酸和盐的反应	133
6.4	核性质	133
	参考文献	133
第7章	石墨的辐照效应	135
7.1	石墨辐照损伤基础	136
7.1.1	中子引起的碳原子离位	137
7.1.2	首级击出碳原子击出的次级离位碳原子	138
7.1.3	离位峰和热峰	140
7.1.4	石墨的辐照损伤	140
7.2	石墨的辐照试验	143
7.3	在快中子辐照下,炭、石墨材料性质的变化	149
7.3.1	Wigner 效应和储能	149
7.3.2	辐照引起的石墨尺寸的变化	155
7.3.3	辐照引起的弹性模量和拉伸强度的变化	172
7.3.4	断裂和疲劳	179
7.3.5	辐照蠕变	196
7.3.6	辐照引起的热膨胀系数的变化	210
7.3.7	辐照引起的热导率的变化	216
7.3.8	密度、孔隙率和腐蚀	220
7.3.9	石墨的渗透性	234
7.3.10	扩散、吸附和解附	236
7.3.11	石墨的比电阻	245
	参考文献	249
第8章	核工程用炭、石墨材料的研发	252
8.1	核石墨的工作环境和要求	252
8.1.1	概述	252
8.1.2	核石墨的工作环境	253
8.1.3	高温气冷堆对石墨的要求	257
8.2	核石墨研发的主要问题	264

8.2.1	石墨的辐照损伤	264
8.2.2	核纯石墨制备的环境问题	265
8.2.3	焦炭骨料的研制	266
8.2.4	各向同性石墨的研制	267
8.2.5	核石墨特性描述	268
8.2.6	石墨构件中缺陷的无损检测	270
8.2.7	核石墨退役	271
8.2.8	核石墨的再生循环	274
8.3	核石墨的研发	274
8.3.1	核石墨研发的重要理论问题	274
8.3.2	核石墨研发途径	275
8.4	核石墨标准的制定	278
8.4.1	堆内石墨构件的设计规范	278
8.4.2	特性描述和评价技术的研发和标准化	279
8.5	核石墨研发回顾和展望	279
	参考文献	281
第 9 章	聚变堆用炭、石墨材料	282
9.1	核聚变原理	282
9.2	氢同位素的聚变反应	283
9.3	发生核聚变反应的条件	284
9.3.1	等离子体加热	285
9.3.2	等离子体约束	285
9.4	核聚变堆面向等离子体材料	286
9.4.1	聚变堆结构	286
9.4.2	聚变堆面向等离子体材料的功能和要求	288
9.4.3	面向等离子体的候选材料	290
	参考文献	294
附录 1	早期核石墨概况	295
附录 2	典型高温气冷堆用核石墨	298
附录 3	第四代核反应堆候选石墨	300

第 1 章

概 论

1.1 核能发展简介

1939年初, Otto hahn 和 Lise Meitner 发现了中子和 ^{235}U 反应,引起 ^{235}U 原子核发生分裂,产生两个裂变碎片,同时释放出2~3个中子和巨大的能量^[1-1]。一个铀核裂变释放出来的能量是一个碳原子燃烧释放能量的5000万倍。铀核裂变的民事和军事应用可能性的研究立即被提上日程。当时正处在第二次世界大战前夕,铀核裂变能利用的研发几乎全部集中在军事应用方面。

天然铀主要由 ^{238}U 和 ^{235}U 两种同位素组成,前者占99%以上,是不易裂变的同位素,易裂变同位素 ^{235}U 只占0.71%。铀核裂变的军事应用需要 ^{235}U 的富集度高于90%,富集度为0.71%的天然铀不能直接用于军事目的。 ^{235}U 和 ^{238}U 是同位素,化学性质相同,无法用化学的方法加以分离、富集,只能依靠质量数的微小差别,用物理的方法分离、富集。物理方法分离铀同位素的难度极大,在当时还只是理论上的可能性。

理论研究揭示, ^{238}U 吸收中子以后可以转变成 ^{239}Pu ,它和 ^{235}U 一样易于裂变,释放出和 ^{235}U 大体上相当的能量和中子。 Pu 和 U 是两种元素,可以容易地用化学的方法分离,制取适于军事应用的核燃料。加利福尼亚大学的研究小组在 Glann T. Seagorg 博士的领导下,于1941年3月,制备了极少量(低于微克量级)的 ^{239}Pu 。当月晚些时候,证实了 ^{239}Pu 在中子轰击下具有与 U-235 相当的裂变性能^[1-2]。生产具有实际使用价值数量的 ^{239}Pu 需要强大的中子源。每次铀核裂变可以释放出2~3个中子,其中只要有一个中子继续参与核裂变,核链式裂变反应就会自持,多余的中子如果不损失掉,就可以用来生产钚。研究、建造能够提供强大中子源的可控、自持核链式反

应装置(即核反应堆),成为大量制造易裂变材料 ^{239}Pu 的前提和当务之急。自持核链式反应能够实现的条件是:任何一代的中子数与相应的前一代中子数的比值 k_{eff} 应等于1,即刚好能实现自持核链式反应,这时核反应堆处于临界状态。 k_{eff} 称之为有效反应性或有效增殖因子,随着反应堆的运行,核燃料燃耗, k_{eff} 值降低,核反应失去自持的条件。实际核反应堆的 k_{eff} 应大于1,以保证核反应堆能够运行足够长的时间,并提供足够多的富余中子用来生产钚。核反应堆必须采取措施,使 k_{eff} 大于1的部分可控地释放出来,补偿因燃料燃耗和裂变产物积累失去的反应性,以便在相当长的时间内维持核链式反应自持的条件,使反应堆具有实际应用价值。

当时铀富集的研究还刚刚开始,只有天然铀供应。热中子和铀核发生裂变反应的几率远远大于裂变产生的快中子和铀核发生裂变反应的几率。理论计算表明:只有热中子才能使天然铀发生自持核链式反应。使平均能量为2MeV的裂变中子(快中子)慢化成平均能量为0.025eV的热中子的有效方法是使裂变中子和质量数低的原子碰撞,在碰撞的过程中把自身携带的能量传递给被碰撞的原子,从而被慢化。能使天然铀发生自持核链式反应的慢化剂材料只有重水、铍和石墨。那时重水稀少,价格昂贵;铍不仅稀少、昂贵,而且有毒;因此石墨成为唯一的选择。

1940年末,Enrico Fermi对用于建造反应堆的石墨提出如下要求:吸收中子能力高的杂质越少越好;密度越高越好;可以商业规模大量供应;能够不用黏结剂堆积成堆^[1-3]。1941年7月,Firmi用工业上能够提供的石墨建成了用于测量中子有效增殖因子 k 的指数试验装置,得到无限大装置的增殖因子 k_{∞} 为0.87,即不能达到临界。科学家们认识到在铀和石墨的纯度改善后, k_{∞} 会得到提高,并可能大于1。当时人们最关注的问题是石墨的硼含量,因为硼的热中子吸收截面特别大,且分布广,高温石墨化时难于去除。1942年春,Fermi用美国NCC(National Carbon Company)生产的硼当量约为 $3\mu\text{g/g}$ 的AGX石墨,得到 $k_{\infty}=0.944$,如人们所预料的那样 k 值得到提高。但硼含量仍然太高,不能使它大于1。1942年初,从Speer炭公司获得了一批质量较好的石墨,1942年5月,用这种石墨建成的指数试验装置的实验结果表明, k 大于1是可能的。因此建造第一座核反应堆的计划迅速扩大,第一个核石墨品牌AGOT由NCC生产出来,其硼当量约为 $1.5\mu\text{g/g}$ 。这种石墨被用于世界上第一座核反应堆CP-1的建造,该堆于1942年12月2日达到临界,从实验上证实了建造可控、自持核链式反应装置是可以实现的。从此人类驯服了蕴藏在原子核内的能量,进入核时代。建造CP-1总共用了

385.5t 石墨^[1-4]。

核工程发展的需要催生了石墨家族的新成员——核石墨；核石墨迎来了核时代。

出于战争的需要,美国在 CP-1 建成后,以石墨为慢化剂用于生产 Pu 的生产堆的建造全力展开,很快建成投产,生产出足够数量的 Pu,制成用于战争的原子弹之一。与此同时,铀同位素分离技术也取得成功,分离出制造另一个用于战争的原子弹所需的高富集铀。

核能军事应用的另一巨大成就是核潜艇。潜艇动力堆要求紧凑,不能使用石墨作慢化剂的体积庞大的反应堆。铀富集技术的解决,为轻水作慢化剂提供了可能性。以轻水为慢化剂的压水堆的研发成功,诞生了核潜艇。

20 世纪 50 年代中,核能的和平利用被提上日程。核能的和平利用建立在军事应用的基础上,是核能军事应用的转型和延伸:从核潜艇用反应堆发展出压水堆、沸水堆和重水堆等,从钚生产堆发展出气冷动力堆。快堆的研发也在很多国家展开。

1.2 核反应堆的分类

可以根据不同方法进行反应堆分类,究竟选用什么方法,主要根据研究的内容和习惯,例如:

根据引起核裂变的中子能量,可以把反应堆分成热(中子)堆、快(中子)堆;

根据使用的慢化剂,可以分成轻水堆、重水堆、石墨堆、熔盐堆;

根据使用的冷却剂,可以分成水(冷)堆、气冷堆、液体金属冷却堆;

根据反应堆的用途,可以分成试验堆、生产堆和动力堆;

.....

1.3 炭、石墨材料在核工程中的应用

炭、石墨材料只用于石墨慢化的热中子堆(气冷堆、石墨慢化水冷却堆和某些设计的熔盐堆和液体金属冷却的反应堆)中。试验堆常常用石墨作热柱材料,但用量不大。轻水堆的慢化剂是普通水,重水堆的慢化剂是重水,快堆根本不需要慢化剂,在这些反应堆中不使用炭、石墨材料。

炭、石墨材料在核工程中主要用于石墨慢化的气冷反应堆中,高温气冷堆是在气冷堆的基础上发展出来的,它把炭、石墨的核工程应用推向一个新的高度,本书主要讨论用于高温气冷堆的炭、石墨材料。模块式高温气冷堆是第四代核反应堆的重要候选堆型,图 1-1 是 10MW 高温气冷模块试验堆的示意图^[1-5],图 1-2 是高温气冷堆球形燃料元件的示意图^[1-6]。

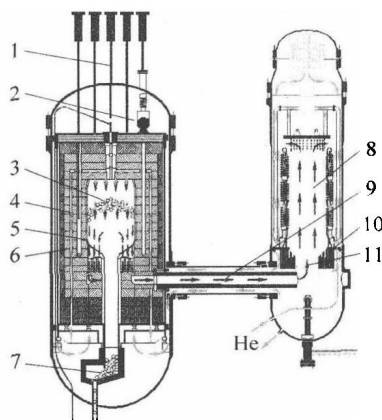


图 1-1 10MW 高温气冷模块试验堆示意图(另见彩页)

- 1—控制棒; 2—燃料装料系统; 3—堆芯; 4—堆芯容器; 5—石墨反射层; 6—屏蔽层(含硼炭砖);
7—燃料卸料系统; 8—热交换器; 9—同心导管; 10—冷氦气流; 11—热氦气流

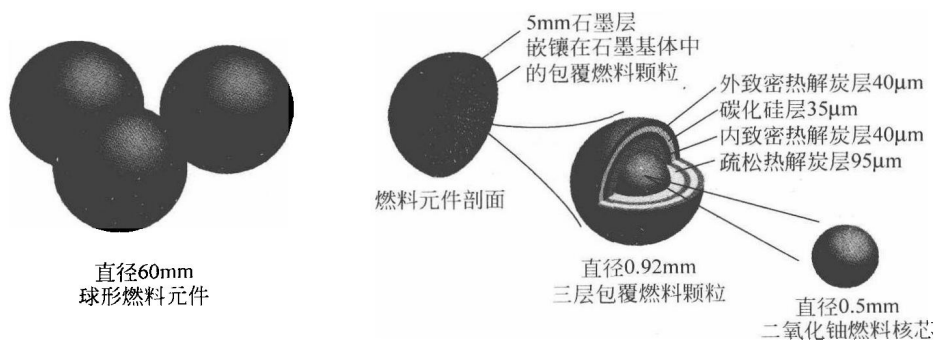


图 1-2 高温气冷堆球形燃料元件(另见彩页)

高温气冷堆的燃料元件是直径为 60mm 的球体,它由 5mm 厚的石墨外壳和直径 50mm 的含燃料的石墨基体(包覆燃料颗粒弥散在基体材料中)球芯组成,它们之间没有物理上的分界线。

图 1-1 和图 1-2 充分展示了炭、石墨材料在高温气冷堆中的重要作用。高温气冷堆的堆芯容器内,几乎全部是炭、石墨材料,可以毫不夸张地说:没有炭、石墨材料,就没有高温气冷堆。此外,炭-炭复合材料也是同心热气管内管 and 高温堆堆芯部件的候选材料。

1.4 核石墨发展概况

核石墨与非核石墨的工作环境不同,前者在强中子辐照场中工作,既要慢化裂变产生的快中子,又要尽量少吸收中子;快中子辐照使石墨的结构发生改变,从而使与组织结构有关的石墨所有性能都发生变化。随快中子注量的增加,石墨的结构和性质都是变化(动态)的。非核石墨不存在中子吸收和快中子辐照问题,如果在使用过程中不被氧化(腐蚀)的话,性能是稳定的。

核石墨是在电极石墨的基础上发展出来的,其生产工艺与电极石墨没有本质上的不同,但技术要求方面则有巨大的差别。作为石墨家族中的新成员,核石墨与非核石墨的根本区别之一是纯度,它必须是核纯的。如前所述,核石墨的硼含量直接影响对中子的吸收,降低硼含量可以提高反应堆核燃料的利用率。世界上第一座反应堆建成后,石墨的工艺和性能得到诸多改进,首先是在提高石墨纯度方面。1948 年,UCPC(United Carbon Products Company)的 George Sermon 把生产直径为四分之一英寸光谱电极的高温氯化处理工艺用于制备大块石墨。GLCC(Great Lake Carbon Company)的 H. L. Juel 和 NCC 的 Victor Hamister 很快就发展出氟化提纯工艺和大规模生产的方法,把硼当量降到 1ppm 以下^[1-3]。从 1948 年至 1952 年 Hanford 建造的生产堆使用了经过氟化提纯的石墨。

英国也发展出自己的反应堆用石墨:PGA,用于生产堆及随后的 Magnox 型动力堆的建造。法国则由 Pechiney 公司发展出相应的核石墨。

还在 1942 年 CP-1 即将达到临界时,E. P. Wigner 就指出高能中子碰撞可使石墨晶格上的碳原子离位,并导致结构损伤。这一预测为加速器实验所证实。中子辐照造成的组织结构的变化称为 Wigner 效应或辐照效应。辐照引起的组织结构变化通常伴随着材料性能的恶化,所以也常常称之为辐照损伤。Wigner 效应使石墨的能态升高,当时对储存在石墨中的能量很担心,早期的预测甚至认为第一座 Hanford 堆只能运行 9 天^[1-3]。实际上,中子辐照损伤的大部分都可以恢复,特别是在反应堆运行温度比较高时。没

有恢复的辐照损伤引起石墨内能增加,并以潜能(Wigner 能)的形式储存在石墨中,通常称之为储能。反应堆运行温度越低,储能的积聚越大。早期(直到 20 世纪 50 年代中)的反应堆主要用来生产 Pu,运行温度一般都比较低($<200^{\circ}\text{C}$),石墨在反应堆运行过程中,储能积聚对反应堆运行构成一定的问题,处理不当会造成事故。低温运行的核反应堆,一般都在运行一定时间后,按计划进行退火,使储能释放出来,以消除储能产生的风险。

辐照损伤的另一重要表现是尺寸变化。在生产堆运行的温度范围内,中子辐照引起石墨轻微的膨胀,对反应堆运行并不构成威胁。

代表性的气冷动力堆堆型是英国的 Magnox 堆和 AGR 堆。Magnox 堆是石墨慢化, CO_2 冷却的动力堆,它采用金属铀燃料,以镁合金 Magnox 为燃料元件的包壳。受金属燃料和镁合金性能的限制,它的冷却剂最高出口温度为 410°C ,发电效率较低。为了提高发电效率,发展出 AGR 堆。这种堆型的燃料元件包壳材料改用不锈钢,用低富集的 UO_2 为燃料, CO_2 冷却剂出口温度提高到 575°C 。法国早期核动力堆的路线和英国的基本相同。美国的试验气冷堆(EGCR)除冷却剂使用氦气外,其构思与 AGR 堆相似。苏联早期反应堆则是石墨慢化水冷却的反应堆,石墨的工作温度与 AGR 堆相近。由于动力堆的运行温度比较高,储能可在反应堆运行过程中自行退火释放,它的积聚不再成为问题。反应堆运行过程中,石墨的尺寸变化表现为收缩。无论是石墨的储能积聚还是尺寸变化,都对反应堆的运行不构成重大的问题。

水的慢化能力优于石墨,热工水力学性能优于 CO_2 ,因而水冷堆的经济性优于气冷堆。为了使气冷堆在经济上具有竞争能力,气冷堆必须摆脱高温下 CO_2 冷却剂对石墨的氧化和金属材料使用温度的限制,提高冷却剂出口温度,以提高发电效率,开拓核能应用的新领域。早在 20 世纪 40 年代后期,人们就提出过用于空间核推进的高温气冷堆的概念,它以浸渍铀的石墨为燃料元件。由于裂变产物的释放和石墨的辐照损伤问题无法解决,研发活动很快就停止了。50 年代末,高温气冷堆的概念在新的环境下应运而生,美国、英国和德国,都对发展高温气冷堆感兴趣。分别于 60 年代后期建成各自的高温气冷试验堆:桃花谷(Peach Bottom)、龙堆(Dragon)和 AVR 堆。这些反应堆毫无例外地都采用石墨作结构和慢化材料、全陶瓷燃料元件和氦冷却剂。石墨、全陶瓷燃料元件和氦冷却剂是高温气冷堆赖以建立的三大物质基础。

在这三大物质基础中,有两项与炭、石墨材料有关:石墨结构、慢化和反

射材料；全陶瓷燃料元件。如图 1-2 所示，全陶瓷燃料元件由包覆燃料颗粒弥散在石墨基体材料里制成。包覆燃料颗粒则是在球形 UO_2 或铀的其他化合物颗粒（直径约 0.5mm）外面均匀地包覆上多层厚度为几十微米的热解炭和碳化硅制成，包覆层的作用是约束放射性裂变产物的释放，保证反应堆和环境的安全。包覆燃料颗粒实际上是一个微型燃料元件，是高温气冷堆技术的关键。高温气冷堆燃料元件的组分全部是耐高温的陶瓷材料，它的耐高温性能远远高于金属包壳燃料元件。石墨在氦气氛中是惰性的，不受使用温度的限制。这种独特的材料组合，使得反应堆冷却剂的出口温度达 950°C ，甚至更高，而水堆的冷却剂出口温度受水的临界点限制，一般只能达到 340°C 左右。冷却剂温度高不仅意味着发电效率高，而且为核能在高品质热能领域的应用创造了条件，如煤的液化和气化、制氢、直接炼钢等。

在高温气冷堆运行温度下，石墨慢化、反射和结构材料在中子辐照下的行为，与以前的气冷堆运行温度下的行为有很大的不同，特别是其尺寸变化行为。传统工艺生产的多晶石墨的结构都具有一定程度的各向异性，辐照引起的变化也是各向异性的，这给反应堆结构设计和使用寿命带来重大的影响。石墨在高温下辐照时，其尺寸变化先是随快中子注量的增加发生收缩，达到最大收缩值后，开始反转。当石墨的尺寸恢复到原始值后，尺寸迅速膨胀，机械物理性能急剧恶化。一般都把尺寸恢复到原始值时的快中子注量作为高温气冷堆石墨的设计寿命。只要一个方向的尺寸恢复到原始值，反应堆的寿命就算终结。通常球床高温气冷堆反射层是不更换的，它对石墨的要求最为苛刻，把石墨的使用潜力发挥到极限。

石墨的各向异性度成为高温气冷堆运行特性的决定性因素之一，石墨研发的中心任务是：从本质上是各向异性的石墨微晶，通过选择适当的原材料、配方和生产工艺，制备出宏观上各向同性度高，线膨胀系数低，导热性好，弹性模量低，强度好的多晶石墨；进行辐照试验，验证石墨在高温堆使用环境下的行为，并取得详尽的辐照条件下的性能数据，满足高温堆结构设计的要求；发现问题，为石墨的进一步研发指明方向。对发展高温气冷堆感兴趣的曾投入大量的人力、物力，进行高温气冷堆用石墨的研发，特别是进行了规模空前的辐照试验。经过反应堆结构设计，炭、石墨材料研发机构和生产企业的共同努力，用了 20 多年的时间，研制出各自的高温气冷堆核石墨。如德国的 ATR-2E, ASR-1RS, V483；美国的 H-451；日本的 IG-110 等，这些石墨可以满足设计寿命为 30 年左右的高温气冷堆的要求。

由于美国三里岛和苏联 Chernobyl（切尔诺贝利）核电站事故；第一次能