

高温气冷堆

高文 编著
原子能出版社

48

5

72.35
431

高温气冷堆

高文 编著



原子能出版社

J
100773

内 容 简 介

本书对高温气冷堆作了比较系统全面的介绍，共分十二章。首先介绍了高温气冷堆的基本概念、发展历史、特点及其在核能利用中的作用，然后介绍了高温气冷堆的结构和各个系统，并以几个典型的实验反应堆和示范电站的运行情况说明高温气冷堆的近况和发展前途。

关于高温气冷堆的安全问题也专门作了评价。

对于核电站和反应堆工程感兴趣的读者，本书将起到丰富知识开扩眼界的作用；对于高等院校有关专业的师生，可作为教学参考书。

3F57/24

高 温 气 冷 堆

高 文 编著

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $16^{1/2}$ · 字数 491 千字

1982年11月第一版·1982年11月第一次印刷

印数 001—850 · 统一书号：15175·422

定价：2.05元

前 言

本书较全面地介绍了高温气冷堆的发展历史和前景及其在工艺供热上的独特用途，对该堆型的物理、元件、热工、结构、设备、安全以及其它部份也作了全面的叙述。

本书适宜于核能工作者、能源工作者以及有关专业的大专院校学生和科技人员阅读参考。

本书是在清华大学核能技术研究所广大科技人员研究高温气冷堆的经验基础上，参阅国外有关资料进行编写的。

本书共分十二章，分别由下列同志编写：第一章 邱大雄，第二章 顾国祥、罗经宇，第三章 李恩德、赵翊民，第四章 董铎、吴宗鑫、张振声，第五章 王大中、梁金玉、张瑞茵，第六章 钟大辛、吴元强、孙金茂，第七章 郑文祥、吴少融、张达方、黄新民等，第八章 顾树华、汪太钧，第九章 郭人俊、吴中旺，第十章 薛大知、梅启智，第十一章 吕应运，第十二章 吕应中、邱大雄、吴宗鑫、黄祥瑞、吴洪林、李金声。另外还有高云鹏、徐元辉、毕庶勋、郭振宇、焦树建等同志为本书部分章节提供素材和校核。

本书由邱大雄主编，王大中校核，吕应中审核。

目 录

第一章	高温气冷堆概述	1
§ 1.1	世界对核能的需求	1
§ 1.2	核动力反应堆发展的前景	2
§ 1.3	气冷堆的发展历史及现状	5
§ 1.4	高温气冷堆的特点及其在核动力中的地位	7
第二章	高温气冷堆物理	14
§ 2.1	高温气冷堆的物理特点	14
§ 2.2	燃料转化和燃料的管理及循环	18
§ 2.3	反应性及其控制	24
§ 2.4	温度系数及安全特性	25
§ 2.5	物理设计中的一般原则	27
第三章	高温气冷堆燃料元件	29
§ 3.1	燃料元件的结构和工艺	29
§ 3.2	燃料元件的性能	44
§ 3.3	高温气冷堆燃料元件的发展研究工作	57
第四章	高温气冷堆堆芯结构	60
§ 4.1	高温气冷堆的结构材料——石墨	60
§ 4.2	堆芯结构介绍	65
§ 4.3	活性区和反射层石墨部件的应力分析和破坏准则	75
第五章	高温气冷堆热工水力特性	81
§ 5.1	高温气冷堆的热工特性和发热分布	81
§ 5.2	冷却剂流动特性	82
§ 5.3	冷却剂温度分布	85
§ 5.4	慢化剂和燃料温度分布	88
第六章	燃料的装卸	90
§ 6.1	球床气冷堆燃料的装卸	90
§ 6.2	柱状元件气冷堆的装卸料	102
第七章	主回路冷却系统及辅助系统	107
§ 7.1	蒸汽循环冷却回路简介	107
§ 7.2	氦冷却剂	107
§ 7.3	蒸汽发生器	108
§ 7.4	循环风机	112
§ 7.5	氦净化系统	118
§ 7.6	堆芯辅助冷却系统	120
§ 7.7	汽-水排放系统	121
第八章	反应堆预应力混凝土压力容器	123
§ 8.1	概况	123
§ 8.2	预应力混凝土压力容器的结构及其性能	126

§ 8·3	预应力混凝土压力容器的结构设计和计算	136
§ 8·4	预应力混凝土压力容器的模型试验	142
第九章	仪表与控制	152
§ 9·1	反应堆的控制特性	152
§ 9·2	测量和仪表	154
§ 9·3	保护系统	155
§ 9·4	调节与控制	156
§ 9·5	控制棒传动机构	159
§ 9·6	电站系统的模拟	163
§ 9·7	数字计算机的应用	163
第十章	安全评价	165
§ 10·1	高温气冷堆的核安全特性	165
§ 10·2	回路放射性和可维修性	165
§ 10·3	高温气冷堆的废物排放	169
§ 10·4	高温气冷堆的事故特性	174
§ 10·5	铀-钍循环燃料制造过程中的辐射问题	176
第十一章	高温气冷堆发展近况与运行经验	179
§ 11·1	高温气冷实验堆近况与运行经验	179
§ 11·2	示范电站近况	196
§ 11·3	大型高温气冷堆设计介绍	202
第十二章	高温气冷堆的发展前景	210
§ 12·1	高温气冷堆的高温工艺供热	210
§ 12·2	直接循环氦气轮机高温气冷堆	227
§ 12·3	高转化和近增殖的高温气冷堆	235
§ 12·4	气冷快中子反应堆	243
§ 12·5	高温气冷堆在远期能源中的地位	252

第一章 高温气冷堆概述

§1.1 世界对核能的需求

目前，世界上燃料需求量中60%以上是靠天然气和石油等气态、液态化石燃料。在今后30—50年内随着能源需求的日益增长，人类将面临这些气、液态化石燃料资源短缺的前景，因此广泛开辟并利用新能源是一个重要的战略性问题。不论是核裂变与聚变能、太阳能、地热、海洋温差等都是具有广泛前景的，但所需的发展时间颇长，在今后30—50年内核裂变能与煤相结合将是能比较现实与经济地大规模发展的主要能源体系。据国外估计，在今后50年内要从裂变能中得到 10^{10} 千焦的能量^[1]，这是一个很大的数量。

目前，裂变能的利用以电能形式为主，据国外估计，到本世纪末世界电力发展中核电的比例将占30—50%左右，装机容量接近15亿千瓦，如表1.1所示。

表1.1 美国能源研究发展署 (ERDA) 对核电发展的估计 (1976年)

	亿千瓦	年份				
		1975	1980	1985	1990	2000
美国	中值	0.39	0.76	1.85	3.40	8.00
	低值	0.37	0.70	1.6	2.85	6.25
其它资本主义国家	中值	0.34	1.15	3.03	5.71	11.50
	低值	0.31	0.92	2.30	4.7	10.70

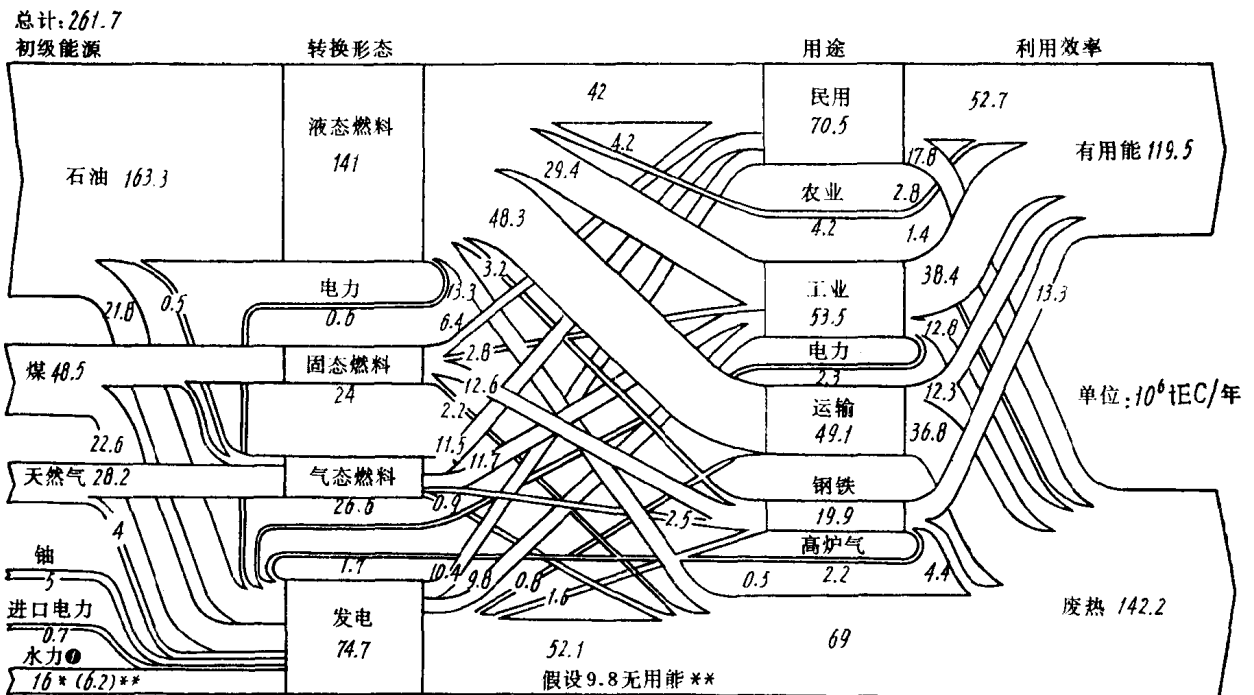


图1.1a 法国能源结构 (1976年统计值)

- * 1000kWh=0.333 tEC——按烧煤发电折算;
- ** 1000kWh=0.129 tEC——按电能折算;
- tEC——吨煤热值单位;
- 水力折算系数。

然而，目前用户直接使用的只有一小部分是电能，而更大部分是以供热、供汽及移动式动力等其他形式消费的。据美国和其他资本主义国家的统计，消费于发电的能源只占总能源消费的 25% 左右。图 1·1a—c 绘出了法国 1976—2000 年能源消费结构示意图。因此，从长远看核能利用不仅要用于发电，而且还必须考虑工业与民用供热等多方面的应用。

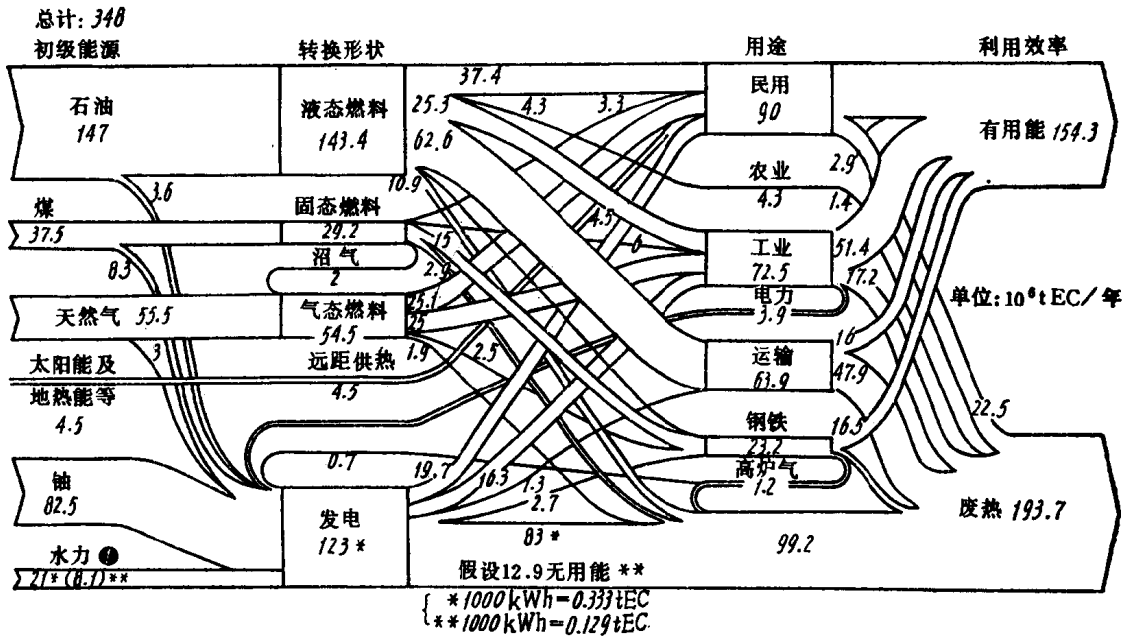


图1·1b 法国能源结构(1985年预测值)

- * 1000kWh=0.333tEC——按烧煤发电折算;
- ** 1000kWh=0.129tEC——按电能折算;
- tEC——吨煤热值单位;
- 水力折算系数。

§1.2 核动力反应堆发展的前景

由于目前的热中子核动力堆只能利用天然铀中所含 0.7% 左右的铀-235 及极小部分的铀-238，故随着核能的大量利用，有经济开采价值的铀资源同样面临短缺的前景。

如果在未来的 50 年内 (1980—2030 年) 需要从裂变能中取得 10¹⁹ 千焦的能量，这相当于 1 亿兆瓦·年的电能 (或 720 万亿度电, 电站效率取 33%)。这些能量若用压水堆来生产，其参数取表 1·2 内的数据，则所需要的铀和分离功量如表 1·3 所示。这一数量比估计可供经济开采的铀资源大。

表 1·2 1000 兆瓦 (电) 压水堆初装量及燃耗量

反应堆裂变物质铀-235的装量 (吨)	1.68
每年补充的裂变物质铀-235量 (吨)	
全部再循环	0.64
仅铀-235再循环	0.80

表 1·3 用压水堆生产 10¹⁹ 千焦需用的铀和分离功

压水堆型	铀-235 (10 ⁴ 吨)	天然铀 (10 ⁶ 吨)	分离功 (10 ⁶ 吨)	总天然铀 (10 ⁶ 吨)	总分离功 (10 ⁶ 吨)
全部再循环	6.4	13.9	11.0	15.7	12.4
仅铀-235再循环	8.0	17.3	13.7	19.1	15.1
不再循环	11.0	23.9	18.9	25.7	20.3
堆的初装量*	0.834	1.8	1.4		

* 初装量按装机容量 50 亿千瓦 (电) 计算浓缩铀尾料 0.25%。

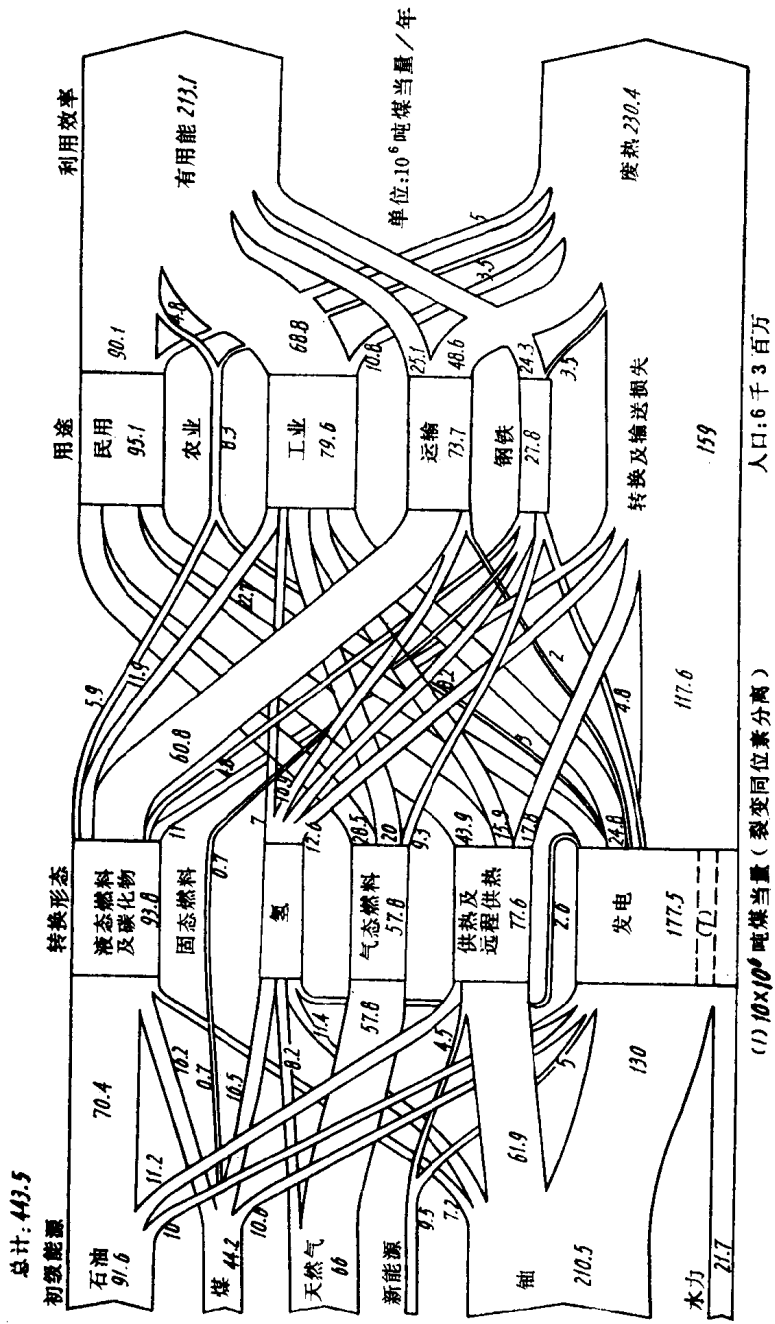


图1·1c 法国能源结构(2000年预测值)

(1) 裂变同位素分离

(1) 10×10^6 吨煤当量 (裂变同位素分离)

表 1·4 列出世界铀资源的估计数字。除了在目前认为有工业开采价值的铀资源外，在有些类型的花岗岩与其他矿石中还存在有极贫的铀矿，但开采成本高，而且开采后可能造成更大的环境污染。此外，在海水中也含大量的铀，但浓度很低，如何经济地提取，目前尚处于研究阶段。

从以上数据可看出，若只发展目前类型的热中子动力堆核电站，则所需天然铀的用量远比目前已探明的铀矿资源大。因此如何充分利用和节约使用铀资源是一个有战略意义的问题，也是核裂变能是否能充当新能源的重要问题，从原则上讲需要选择一个先进的核动力堆系统，它应能达到下列目标：

1. 核燃料转化比高，能将增殖原料铀-238 或钍-232 尽可能多地转化成裂变燃料，以提高核资源利用率。

目前商用的热中子动力堆，其转化比约在 0.5—0.6，其铀资源利用率仅 1—2%。

从 50 年代开始，国外已有人着手研究利用铀-238 和钍-232 的增殖堆。如果铀-238 和钍-232 能全部被利用（扣除后处理与再加工损失后，按总利用率 60% 计），则依靠目前已探明的廉价铀及钍资源，可供 20 亿千瓦核动力堆运行几百年，同时还可能经济地用成本较高的更大量铀钍资源。这样铀钍才能成为真正的新能源。因此，目前世界各国对快中子增殖堆花费了很大力量来研究。同时也研究与发展利用钍达到高转化比和接近增殖的先进热中子堆如高温气冷堆，这是节约核资源的一条重要途径。

2. 能扩大裂变能应用范围，能量转换效率（热效率）高。在充分利用铀与钍的前提下，扩大核能的应用范围将成为重要问题；若能在发电以外的能源消费领域内利用核能，必须能在更高温度下供热或进行能量转换，使之成为更合适的能量载体或次级能源。目前正研究的高温气冷堆及核能-煤转换或核能-氢能体系就是解决这一问题的途径。高温气冷堆可以提供 950℃ 左右的热源，不仅能直接供应需要高温的工业热源，如冶金、建筑材料与化学工业，还可以使煤转化为气体或液体燃料，甚至直接使水裂解产生氢气，作为用途广泛的次级能量载体。这样使核能几乎可以满足一切领域的能源需求。

3. 反应堆安全性好。随着核动力的发展，在今后 30—50 年内将有上千座大型核电站及供热堆运行，愈来愈多的动力堆需要建造在工业区或人口稠密区，这就要求核电站在正常运行和事故情况下对环境污染小，要求反应堆固有的安全性好，要求反应堆系统设备放射性水平低，易于维护和检修。

4. 技术现实性和经济性好。一种先进核动力反应堆系统的研究、发展和商用化的速度应能满足核动力发展的要求，即在今后 30—50 年内能建成上百座商用堆，否则更先进的能源体系将可能发展到商用规模，而核裂变堆将被其取代，因此选择堆型时必须考虑目前该堆型的研究与发展的工业基础。

在经济上核电站的发电成本要低于相应的火电成本，这样才有利于大量商业推广。

过去二十年来各种先进堆型就是按照这些要求发展的。到目前为止，经过试验与比较，一般认为比较符合上述要求的先进堆型，主要有两种，即快中子增殖堆和高温气冷堆。前者

表 1·4 世界铀资源估计值(单位 10³吨)

产地	探明储量*	估计附加储量*	推测资源量**
非洲	572	200	1300—4000
亚洲	37	24	200—1000
大洋洲	296	49	2000—3000
欧洲	88	300	300—1300
南美和中美	60	14	700—1900
北美	830	1711	2100—3600
总计	1883	2248	6600—14800

* 价格按 80—130 美元/公斤；

** 价格按 130 美元/公斤。

对增殖燃料潜力很大，而后者对扩大用途前景更佳。本书主要介绍高温气冷堆这种先进堆型，它可以发展成为一种先进反应堆系列，包括高温气冷堆和气冷快增殖堆，其氦技术甚至可进而用于聚变堆。

§1.3 气冷堆的发展历史及现状

高温气冷堆是在低温气冷堆基础上发展起来的。不论在欧洲，还是在美国，低温气冷堆都是反应堆发展中最早的一种堆型，被广泛用于生产钷。

早在1956年英国就建成了净电功率45兆瓦的卡特霍尔（Calder Hall）电站。这种第一代气冷堆采用石墨慢化，二氧化碳冷却，金属天然铀燃料，镁合金（镁铍）包壳，故称镁诺克斯型（Magnox）气冷堆。后来在英、法、意和日本等国建造了一大批这样的堆。它们的用途由主要生产钷改变为主要生产电能，其参数也作过一些改进，大致是堆芯功率密度由开始0.55兆瓦/米³提高到0.8兆瓦/米³，二氧化碳出口温度由开始的345℃升到400℃，冷却剂工作压力由开始的8个大气压提高到20个大气压左右，热效率由开始的19.1%上升到30%，单堆电功率是25万千瓦。目前英国已有11座核电站共26个这种类型的反应堆投入运行。这类堆的运行情况良好，可利用率高，但后来由于基建投资大，发电成本高等经济原因停止了建造。

镁诺克斯型反应堆的参数不能进一步提高的原因是金属铀和镁合金包壳不能耐受更高的温度。后来英国对此作了改进，采用二氧化铀和不锈钢包壳，并采用稍加浓铀（约2%加浓度）代替天然铀来补偿不锈钢的中子吸收。这种新元件允许堆芯出口温度提高到670℃左右，可以直接配置标准参数的蒸汽轮机，电站热效率提高到40%。这就是第二代气冷堆，或称改进型气冷堆（AGR）。1963年在英国温茨凯尔建造了电功率为34兆瓦的模式堆。在它的初步运行经验基础上，英国开始成批建造大型的改进型气冷堆，它们的主要参数大致是：堆芯功率密度2.8兆瓦/米³、CO₂进出口温度290—675℃、工作压力40大气压、热效率40%、单堆电功率60万千瓦。从1965—1970年共有五座核电站10个这种类型堆开始建造。由于AGR堆仅在小型模式堆的初步运行经验基础上就建造大型堆，对其主要材料与设备研究工作做得不够，因此建造过程中遇到较大困难，使建设计划拖期，但目前技术困难已相继解决，有两座核电站的四个堆已投入运行，其它的预计在1981—1982年内投入运行。改进型气冷堆的设计和运行经验对发展更先进的气冷堆型是很重要的。如预应力混凝土压力壳、陶瓷绝热纤维、大型钢制或预应力混凝土安全壳、循环风机以及气体流动引起的振动等对后来的设计都很有价值。

高温气冷堆（HTGR）是改进型气冷堆的进一步发展。在AGR堆中，如要进一步提高堆芯出口温度将受到CO₂与元件不锈钢包壳材料化学上不相容的限制，故其温度最高不超过690℃。为了进一步提高温度，必须改进冷却剂和堆芯材料。高温气冷堆内选择了化学上呈惰性和热工性能好的氦气作冷却剂。燃料元件采用全陶瓷型的热解碳涂敷颗粒，这是高温气冷堆的一项技术突破，这样就允许燃料包壳在1000℃以上的高温下运行。石墨被用作慢化剂兼堆芯结构材料。这样堆芯出口温度可提高至750℃以上甚至可达950—1000℃，堆芯功率密度达6—8兆瓦/米³，用于发电的热效率可达40%左右，而用于高温供热时总热效率可达60%以上。

图1·2和图1·3表示 Magnox 型堆, AGR 型堆和 HTGR 型堆的出口气体温度和堆芯功率密度逐年变化的情况。

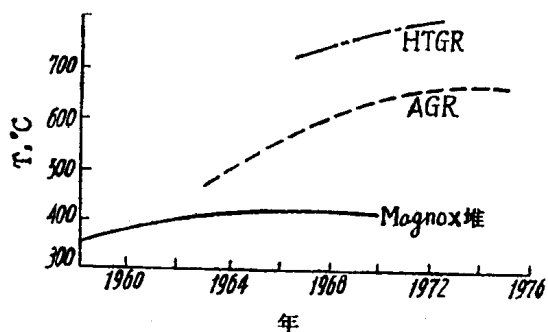


图1·2 各类气冷堆的出口气温

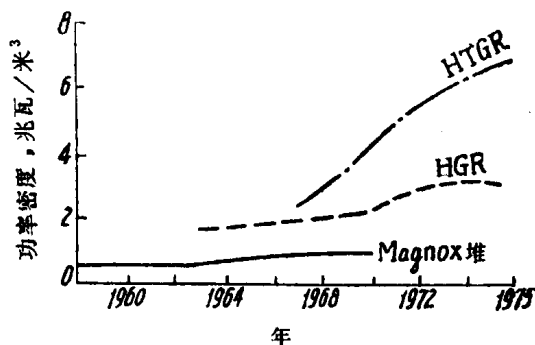


图1·3 各类气冷堆的功率密度

由于核电站热效率不仅与冷却剂温度有关,而且受循环风机的相对功率消耗的影响,而后者与冷却剂的物性和压力有关。图1·4和图1·5表示了冷却剂压力增长数据和循环风机的相对功率,由图可知相对功率消耗由 Magnox 型堆的 13% 降到 HTGR 型堆的 3—4%。图1·6是反应堆热效率的相对增长。

早在 1956 年英国就开始研究高温气冷堆,后来得到欧洲原子能联营的支持,由欧洲 7 个缔盟国参加制定了共同研究高温气冷堆的计划,即“龙”(Dragon)试验堆建造和运行计划。龙堆热功率为 20 兆瓦,不发电。1964 年 8 月首次临界,1965 年开始功率运行,1966 年 4 月达到满功率,一直运行到 1976 年 3 月,完成了全部运行与试验计划。

美国在 1957 年着手高温气冷堆的研究,1962 年开始在宾夕法尼亚州比利诺瓦戈-丹姆斯山处桃花谷建造电功率 40 兆瓦的桃花谷高温气冷实验堆 (Peach Bottom), 1966 年 3 月该堆达到临界,1967 年年中满功率运行,一直运行到 1974 年 10 月底按计划完成试验任务,停堆退役。

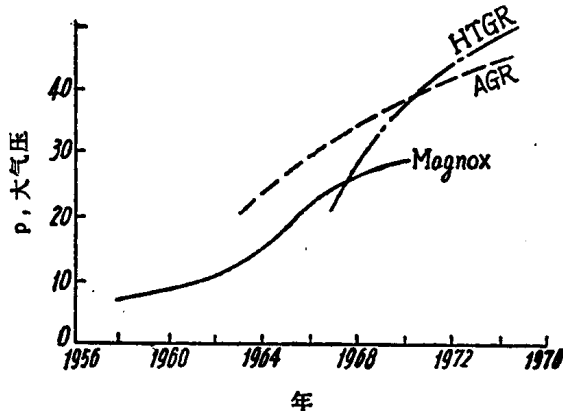


图1·4 各类气冷堆一回路中的压力

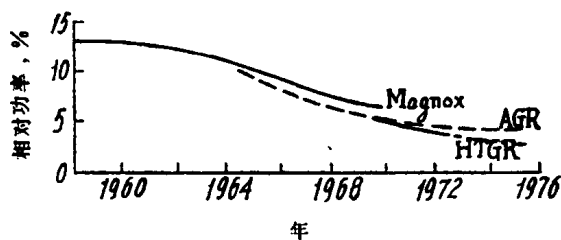


图1·5 各类气冷堆冷却剂循环的相对功率消耗

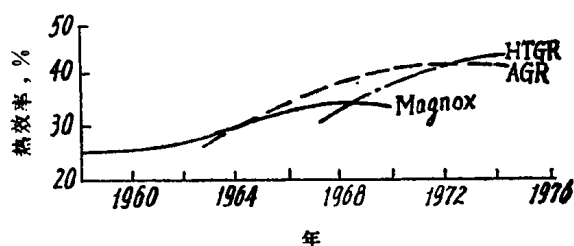


图1·6 各类气冷堆的热效率

西德从 1957 年开始研究发展具有自己特色的球形元件高温气冷堆,于 1959 年开始建造电功率 15 兆瓦的球床高温气冷堆 (AVR)。该反应堆建在于利希核研究中心,1966 年 8 月

临界，1967年12月首次向电网供电，1968年2月达设计功率，1974年出口温度又提高到950℃，运行情况良好。

通过三个高温气冷实验堆运行，共积累了20多个堆年的运行经验。这些堆的成功运行历史，说明了高温气冷堆在技术和工艺上不存在重大的问题。其中较突出的收获是：

1. 证明了全陶瓷型元件堆型的现实性与可靠性。涂敷颗粒的破损率与裂变产物渗透率均较预计值为低，在表面温度超过1000℃时仍能可靠地运行，这样就为发展大型高温气冷堆打下了基础。

2. 证明了氦技术的现实性。氦冷却剂的温度可达750—950℃以上，同时高纯氦的制备与净化技术上也没有困难。多年运行经验表明，氦气与堆芯及一回路部件在化学相容性上未发现重大问题，工程规模的氦密封技术也可以解决。

3. 证明了堆芯结构的可靠性。石墨堆芯结构是坚固和可靠的，石墨在中子照射下出现的收缩问题也是可以妥善处理的。此外球床堆堆芯的流动和装卸机构均已成功地运行多年。

在实验堆运行基础上，从1968年起美国和西德分别开始了模式堆的建造工作。1968年美国通用原子公司（GA）在美国原子能委员会资助下为科罗拉多公用事业服务公司建造电功率330兆瓦的圣·符伦堡高温气冷模式堆。该堆于1974年1月初临界。由于风机等设备部件的局部故障，曾造成堆芯进水等事故，一直拖延到1976年12月才首次发电，以后仍由于局部设备故障，经检修改进后于1978年4月达到70%设计功率。西德于1969年在人口稠密的鲁尔区西北温特罗浦建造电功率300兆瓦的钍高温气冷球床堆（THTR-300），现正在建造中，预计1981年建成。目前西德又在进行500兆瓦热功率的高温工艺供热堆（PNP）及600兆瓦电功率的蒸汽循环高温气冷堆（拟向煤气化厂供汽）及氦气轮机高温气冷堆（HHT）的研究与设计工作。

§1.4 高温气冷堆的特点及其在核动力中的地位

1.4.1 高温气冷堆的基本概念

高温气冷堆用氦作冷却剂，采用涂敷颗粒燃料（氧化物或碳化物核心），以及石墨作慢化剂和堆芯结构材料。

涂敷颗粒是将陶瓷燃料做成直径200—800微米的燃料核心，外面包上几层热解碳起元件包壳作用，涂敷层厚度约150—200微米。涂敷颗粒类型有代表性的有两种：一种称BISO颗粒，采用两种涂敷层，内层是低密度疏松热解碳层，用以贮存裂变气体，外层是高密度的致密热解碳层，用以承受裂变气体的压力，防止裂变产物进入氦回路；另一种称TRISO颗粒，采用三种涂敷层，即在热解碳的疏松层外的两层致密层之间加一层碳化硅（SiC）层，用以防止金属裂变产物铯、锶、钡等的扩散迁移。

将涂敷颗粒分散在石墨基体中压制成燃料密实体，再将密实体装入有石墨包壳组成的各种几何形状的燃料元件。

燃料元件的形式基本上可分两类：一类是球形元件，例如AVR和THTR-300都是采用6厘米直径的石墨球，内部是涂敷颗粒和石墨基体压制成的密实体，外部是石墨球壳；另一类是柱形元件，它可以是圆棒或管型，也可以是内装细棒状密实体的六角棱柱块，例如圣·

符伦堡堆采用的是六角棱柱块，尺寸是约 35.5 厘米（横断面宽）× 80 厘米（高），块上均匀打有燃料孔和冷却孔，孔呈三角形排列，冷却孔两端打通，燃料孔一端不通，将燃料密实体做成短圆柱装入燃料孔内，再用石墨柱塞住。燃料所发的热通过石墨基体传给流过冷却孔的氦冷却剂。块上还打有控制棒孔，控制毒物孔和装卸孔。

图 1-7 表示了 BISO 颗粒，TRISO 颗粒，燃料密实体和燃料元件的结构。

堆芯结构基本上也分为两类：一类是球床堆，另一类是棱柱堆，见图 1-8 和图 1-9。堆芯一般是圆柱形的，四周围有石墨反射层，反射层外有金属热屏，整个堆芯装在预应力混凝土压力壳内。

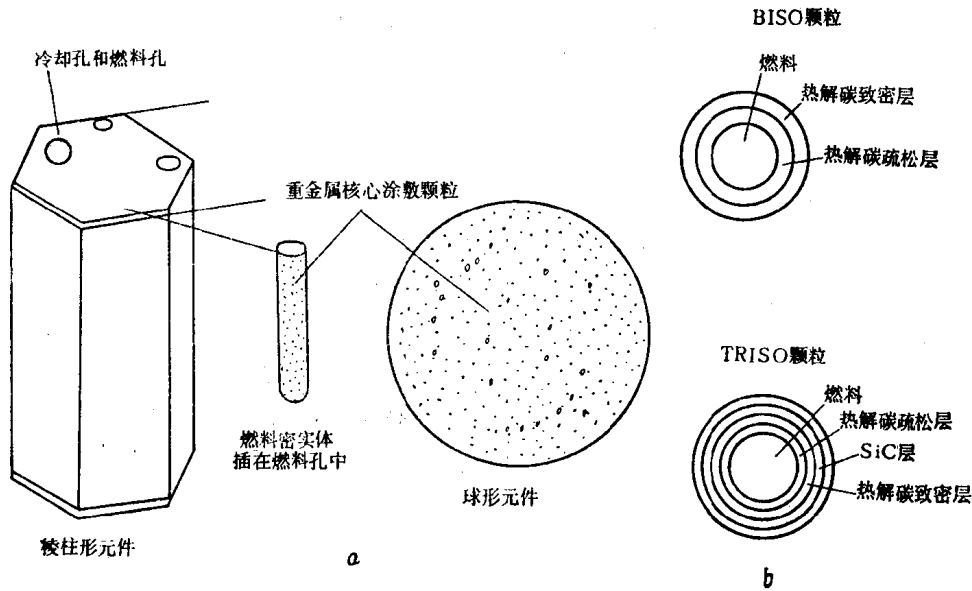


图1-7 a.燃料元件；b.涂敷颗粒。

在球床堆中，燃料元件由堆顶装入，从堆芯底部反射层的排球管排出。排出的燃料球经过燃耗分析后，将尚未达到预定燃耗的再送回堆内使用（如 THTR-300 内每个球平均经过六次循环）；也可以采用加深燃耗一次通过循环的方式。在棱柱堆中，可通过堆顶的换料孔用特制的机械进行元件装卸。

反应堆采用含硼吸收棒进行控制。在球床堆中有两类控制棒，一种是可快速插入反射层的调节棒与安全棒，另一种是直接插入球床的停堆补偿棒。在棱柱堆中，控制棒可插入六角棱柱块上的控制棒孔道中，这些孔道可与装卸孔合用，也可单独开孔。

大型高温气冷堆都采用预应力混凝土壳，堆芯和整个一回路（包括蒸汽发生器和氦风机）都安装在壳内，混凝土壳内的氦气压力为 40—50 大气压，由圆周方向和轴向预应力钢索承受。预应力混凝土壳既是一次冷却系统的压力容器，又是堆的生物屏蔽层。壳内设备布置方式可以不同：有些采用单腔式，如 THTR-300 的蒸汽发生器和风机放在同一腔内的堆芯侧面，而圣·符伦堡堆的蒸汽发生器和风机则放在堆芯下部。但目前大型高温气冷堆的设计趋向于采用多腔式结构，即堆芯在中心空腔内，而蒸汽发生器和风机布置在四周侧壁内的较小空腔内。预应力混凝土壳内壁设有钢衬，以保证氦气密封，钢衬内铺绝热保温层，以防止热氦气直接与钢衬接触。绝热材料可以采用陶瓷纤维，也可以用多层金属箔片；为了增加可靠性，

目前也有将绝缘层放在钢衬外的热衬式设计。壳内氦气的气流组织，应能保证尽可能多的设备处于堆的入口氦气温度（250—300℃）下。钢衬外壁还焊有冷却水管以保证混凝土处于低温。

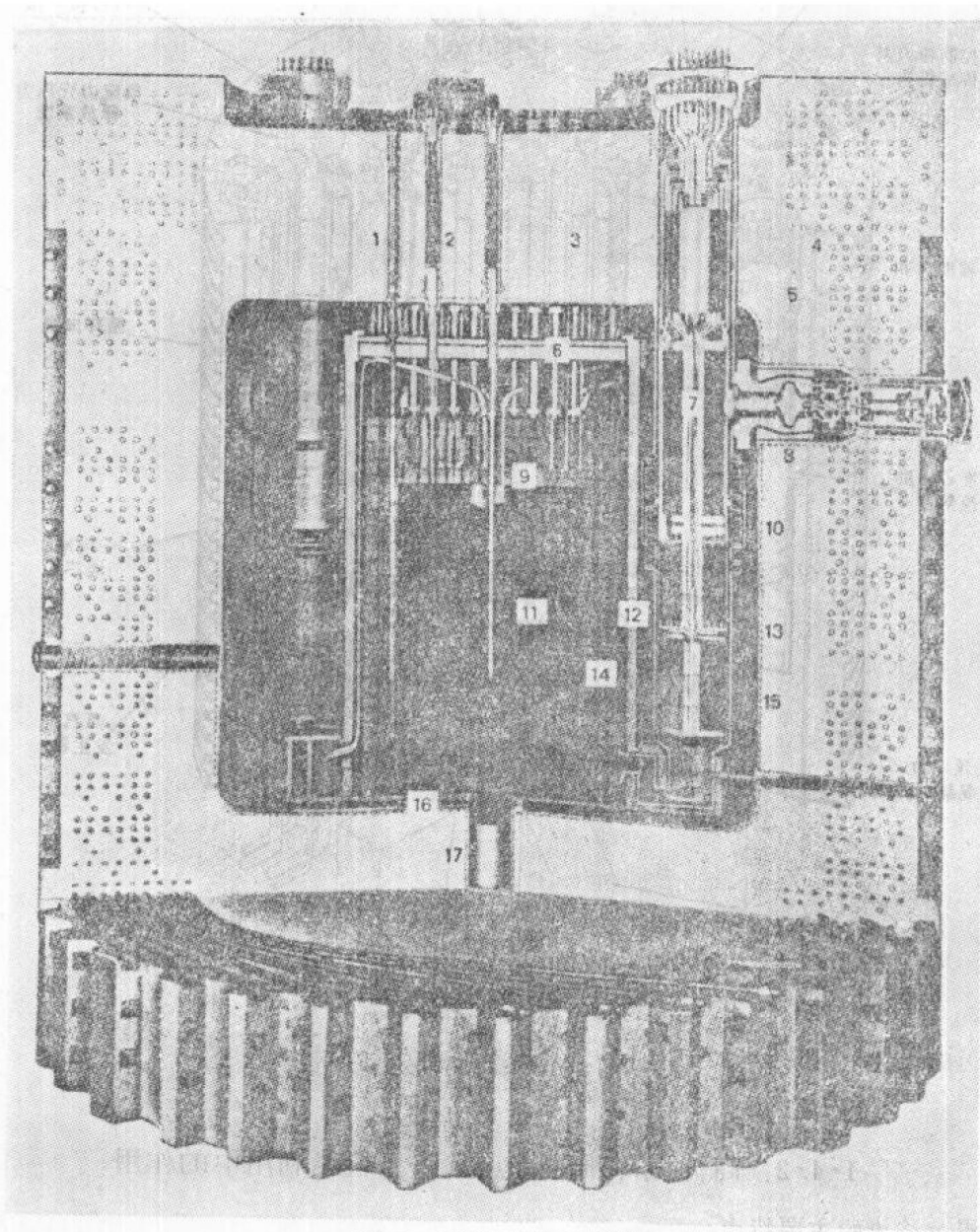


图1·8 球床堆结构示意图

- | | |
|---|------------|
| 1. 反射层中的控制棒; | 10. 衬里; |
| 2. 停堆棒; | 11. 堆芯; |
| 3. 预应力混凝土压力壳; | 12. 侧热屏; |
| 4. 环向预应力钢索 (annular gripping elements); | 13. 热绝缘; |
| 5. 蒸汽发生器腔; | 14. 侧反射层; |
| 6. 热屏蔽 (顶部); | 15. 钢衬冷却管; |
| 7. 蒸汽发生器; | 16. 底部热屏; |
| 8. 风机; | 17. 卸球管。 |
| 9. 堆芯顶部; | |

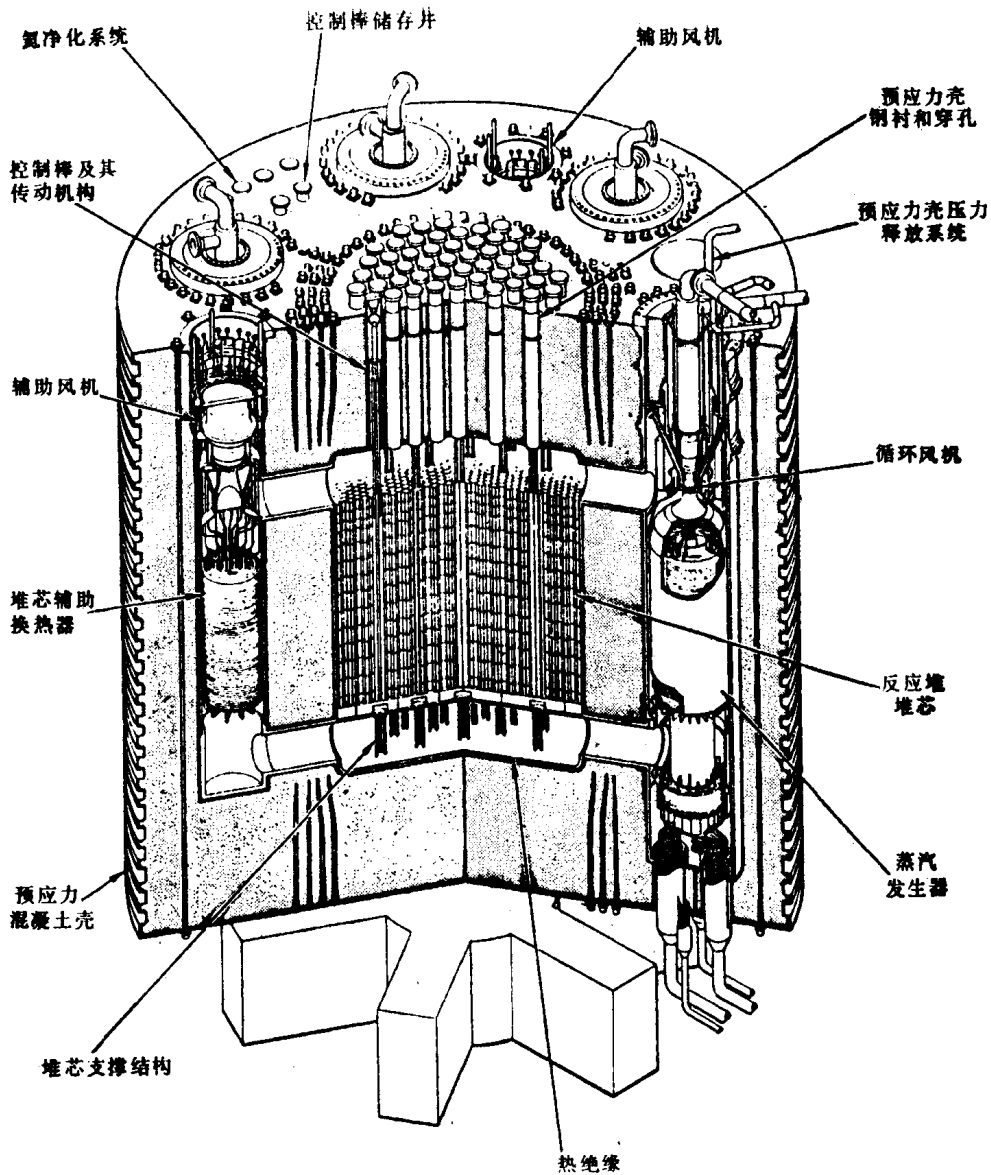


图1.9 棱柱堆结构示意图

1.4.2 高温气冷堆的特点及其在核能利用中的作用

高温气冷堆的主要特点:

1. 高温气冷堆的氦气出口温度高, 可达 750—950℃, 不仅发电效率较高, 而且可用作高温工业供热, 这是任何其他堆型所不可能达到的, 由此开辟了核能利用的广阔途径。

在发电方面, 采用高效率的蒸汽循环后, 热效率可达40%。若采用直接循环氦气轮机, 则不仅使电站设备及系统大大简化, 降低比投资, 而且可以充分利用氦气出口温度高的特点, 进一步提高发电热效率, 当反应堆出口氦气温度达 850℃ 时其热效率即可达 40%, 如果利用氦气轮机排出的余热, 加一低温的氨蒸汽循环, 即采用双重循环, 则整个核电站的热效率可达 45—50%。如果能将反应堆出口温度提高到 900—1000℃, 则原则上还有可能采用三重

循环，将热效率进一步提高到 55—60%。另外，氦气直接循环的排热温度高（150—200℃），而且是显热形式，不像蒸汽循环是汽化潜热形式，因此可以在不影响其发电效率情况下，向附近地区低温供热，这样就使其热能总利用率提高到 60%。例如，1974 年西德在奥伯豪森成功地运行了一座 50 兆瓦(电)试验性氦气轮机，是闭合循环的发电与供热两用装置，热源是用煤气将 27 巴压力的氦气加热到 750℃，发电净热效率 31.3%，除发电 50 兆瓦外尚有 53.3 兆瓦的热能用于地区供热，总的能量利用率达 65%。

在高温供热方面，高温气冷堆的高温还可用于炼钢、精炼石油、煤的气化、生产氨、生产氢等多种用途，这是高温气冷堆独有的特点。如果核能裂解水制氢的工艺获得成功，而且其成本允许它与别的燃料相竞争，则核能的利用将能在更大范围内取代化石燃料，这是具有重要战略意义的。表 1-5 列出了高温气冷堆的可能应用方向。

2. 高温气冷堆可采用多种燃料循环，且可获得较高的核燃料转化比，以节省核燃料。

高温气冷堆的燃料循环灵活性很大，它可以采用铀-钍循环(90%铀-235-钍循环和铀-233-钍循环)，也可采用低浓铀燃料循环(5—10%加浓度铀-235)，也能使用钷或混合燃料。

在采用铀-233-钍燃料循环时，由于铀-233在热堆的中子谱下 η 值较高(见表 1-6)，加上石墨吸收中子颇少，故高温气冷堆的转化比在理论上是可能大于 1 的，如图 1-10 所示。实际上要达到理论值是有困难的，但做到高转化和近增殖是有可能的，近来国外这方面做了不少研究。转化比可达 0.8—1.0，这样则可使热中子堆的核资源利用率提高到 5—10%，对于节省天然铀资源意义很大。

高温气冷堆内使用的各种燃料循环，可以在同一个反应堆内连续过渡，即可以从一个燃耗高但转化比低的低浓铀循环，过渡到燃耗低转化比高的铀-233-钍循环。这样可以较好的适应铀矿资源、分离功和后处理能力等条件的变化，获得最佳的经济效果和资源利用率。各种燃料循环在同一反应堆内的过渡性能见图 1-11。

在发展高温气冷堆的基础上，可以进一步发展气冷快中子增殖堆。气冷快中子增殖堆可

表 1-5 高温气冷堆可能应用方向

应用方向	流程参数		
	要求温度(℃)	要求压力(大气压)	
1 改善核燃料利用，提高热效率到			
40%: 蒸气轮机	550—560	240	
氦气轮机	850—950	40—60	
50%: 双重循环	850—950	40—60	
60%: 三重循环	890—950	55	
2 生产黑色金属	850—1250	5—6	
3 煤的气化	加氢气化	700—800	25—50
	蒸汽气化	800—950	25—50
4 石油精炼			
5 生产氨和甲醇	750—900	30	
6 生产氢: 热化学裂解水	730—1000	10	

表 1-6 几种核燃料的有效次级中子数 η 值

燃料种类	²³³ U	²³⁵ U	²³⁹ Pu	²⁴¹ Pu
η 值	2.22	1.95	1.80	2.09

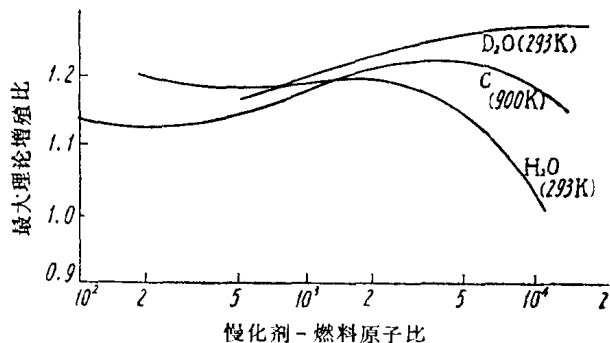


图 1-10 各种慢化剂内最大理论增殖比与慢化剂燃料原子比之间的关系(燃料为铀-233)