

15706

赠阅

国外反应堆技术

国外石墨水冷反应堆

(调研报告)

212科技图书馆

前 言

1944年9月世界第一个铀石墨水冷产钚堆(汉福特B堆)投产以来的三十年内,美、苏两国建造了26座铀石墨水冷反应堆。美、苏的石墨水冷堆在50年代以前全部是产钚的军用堆;在60年代建造了一批产钚发电两用堆。鉴于核储备的日益充实和对电力日益增长的需要,美国关闭了早期的汉福特产钚堆,使新生产堆NPR曾在动力工况下运转。苏联在发展水动力堆的同时,在70年代仍在进一步研究和发 展高功率的压力管型铀石墨沸水堆,以适应大型热堆核电站的需要,并为快堆积累核燃料——工业钚,同时利用两用堆继续得到必要数量的军用钚。

美、苏石墨水冷堆发展道路的共同点是,从初期的天然铀燃料、石墨减速、轻水冷却的产钚堆,逐步发展成稍加浓铀、以 UO_2 作燃料、石墨减速和水、汽冷却的两用堆和动力堆。但在堆体结构、燃料元件、工艺管道、控制系统、冷却方式、水质处理、屏蔽防护、结构材料、工艺运输和技术参数等方面均有较大差异。

编 者 的 话

石墨水冷反应堆是核反应堆的一种重要堆型，这类反应堆多为生产堆和两用堆，苏联还建造了一批这种类型的动力堆。两个超级大国均建有一定数量的石墨水冷堆生产核燃料，为其核讹诈政策服务。

这类反应堆在国内过去尚缺乏系统介绍。遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们对美苏两国的石墨水冷堆的技术特性、运行经验和发展动向进行了调研，汇编成册，供有关部门和从事有关工作的人员参考。

这类反应堆主要用于军事目的，各国均注意保密，公开发表资料甚少，因此本报告仅就所能搜集到的资料加以归纳分析，但介绍的情况还很不完整。

国外文献中所提供的资料、数据常有相互矛盾，甚至夸大之处，虽经注意校核删节，但疏漏之处仍可能存在，请读者参阅时予以注意。

编者自感阅力疏浅，政治思想和业务水平很低，加之本文涉及专业知识较广，资料有限，文中定有很多缺点、错误与疏漏之处，恳请读者批评指正。

1976年3月

目 录

第一部分 美国的石墨水冷反应堆

一、发展概况.....	(1)
二、汉福特生产堆.....	(2)
(一)堆体结构.....	(2)
1. 石墨砌体.....	(2)
2. 工艺孔道.....	(3)
3. 工艺管.....	(3)
4. 燃料元件.....	(4)
5. 控制棒、安全棒和安全球.....	(4)
6. 堆体屏蔽.....	(5)
(二)工艺冷却系统.....	(5)
(三)控制保护系统.....	(6)
1. 控制系统.....	(6)
2. 保护系统.....	(6)
3. 监测系统.....	(7)
4. 安全特点.....	(7)
(四)操纵运行.....	(8)
1. 物理启动.....	(8)
2. 开 堆.....	(8)
3. 停 堆.....	(8)
4. 换 料.....	(9)
(五)水质控制.....	(9)
1. 水质要求.....	(9)
2. 工艺水的处理.....	(9)
3. 水处理的改进.....	(11)
4. 事故冷却.....	(12)

5. 污水排放.....	(12)
(六) 运行经验.....	(12)
1. 事故处理.....	(12)
2. 石墨潜能.....	(15)
3. 铅—2 合金工艺管的使用.....	(15)
(七) 技术特性.....	(16)
三、汉福特新生产堆 (NPR)	(17)
(一) 汉福特新生产堆的特点.....	(17)
(二) 技术参数.....	(18)
(三) 结构、系统与运行问题.....	(20)
1. 工艺流程.....	(20)
2. 堆体结构.....	(20)
3. 铅—2 合金压力管.....	(21)
4. 石墨砌体.....	(22)
5. 碳钢回路.....	(22)
6. 燃料循环.....	(23)
7. 水质控制.....	(24)
参 考 文 献	(27)

第二部分 苏联的石墨水冷反应堆

一、发展概况.....	(29)
二、苏联石墨水冷堆的主要特点.....	(30)
三、苏联石墨水冷堆的技术进展与发展动向.....	(31)
四、第一原子能电站.....	(31)
(一) 电站概况.....	(32)
(二) 运行经验.....	(34)
1. 释热元件达到的燃耗.....	(34)
2. 工艺管的使用情况.....	(35)
3. 石墨砌体在高温下的长期使用性能.....	(36)
4. 控制棒的改进.....	(37)
5. 倒料运行.....	(38)
6. 一回路水质.....	(38)

7. 蒸汽发生器.....	(40)
五、西伯利亚原子能电站.....	(40)
六、别洛雅尔斯克原子能电站.....	(41)
(一) 别洛雅尔斯克原子能电站概貌.....	(41)
(二) 1号堆的结构特点.....	(41)
(三) 2号堆的技术改进.....	(43)
(四) 运行经验.....	(45)
1. 工艺冷却回路.....	(46)
2. 燃料管道.....	(46)
3. 石墨砌体.....	(47)
4. 控制保护系统.....	(47)
5. 功率监测与倒料.....	(47)
6. 冷态启动.....	(48)
7. 水化学.....	(48)
8. 辐射状况.....	(49)
9. 设备状况.....	(49)
10. 管道和阀门.....	(49)
11. 计算机.....	(49)
12. 实验研究工作.....	(50)
13. 技术经济指标.....	(50)
七、列宁格勒原子能电站.....	(51)
(一) 列宁格勒原子能电站的工艺流程和主要参数.....	(52)
(二) 列宁格勒原子能电站的技术特点.....	(53)
(三) 反应堆的结构.....	(54)
(四) 电站的控制与调节.....	(57)
(五) 辐射安全.....	(58)
(六) 反应堆的物理启动.....	(58)
(七) 电站的动力启动.....	(61)
八、苏联石墨水冷压力管式反应堆原子能电站的建造和 设计上的改进.....	(62)
(一) 铀石墨水冷压力管式反应堆原子能电站的建造.....	(62)
(二) 铀石墨水冷压力管式反应堆设计上的改进.....	(62)
参考文献.....	(65)

美国的石墨水冷反应堆

一、发展概况

1942年12月2日美国的CP-1反应堆在芝加哥首次达到临界之后,美国就选定汉福特为基地筹建生产堆。从1943年到1963年在汉福特的四批建造了九座铀石墨水冷反应堆,这就是44—45年投产的B堆、D堆、F堆;47—50年投产的C堆、H堆、DR堆;55年投产的KE堆、KW堆;63年底临界的N堆(NPR堆)。堆况如表1所示。

表1 美国石墨水冷堆简表^[1-4]

堆名	热功率,兆瓦	产钚量,公斤/年	投产时间	关闭时间	运行年数
B堆	250	75	1944年	1968年	22*
D堆	250	75	1944年	1967年	23
F堆	250	75	1945年	1965年	20
C堆	1000	300	1947年	1971年	24
H堆	1000	300	1949年	1965年	16
DR堆	1000	300	1950年	1964年	14
KE堆	1000	300	1955年	1971年	16
KW堆	1000	300	1955年	1971年	16
N堆	4000	1200	1963年		

* 停堆两年未计入

这些堆在设计原理、堆体结构上大体相似,但随着反应堆工艺学、堆材料、核燃料生产的发展和运行经验的日益丰富,在技术上有所改进,单堆功率逐步提高。早期建造的汉福特生产堆由于建期较早,成本较高,使用已久,在不影响美国核储备需要的情况下,于1964年N堆投产之后相继关闭。但是这批生产堆积累了一定的运行经验,可资借鉴。

N堆是目前世界上热功率最大的反应堆，是前八个生产堆的改进型，从1966年转入动力工况运行。为适应发电的需要，在冷却回路、结构材料、燃料元件、水质标准、控制系统等方面均做了改进，工艺参数提高。

美国石墨水冷堆的重要特点是卧式反应堆。这给工艺孔道布置、工艺管结构、反应堆控制、装卸料方式、一回路管道布置等带来一系列与立式堆不同的特点。

下面分别介绍汉福特生产堆和汉福特新生生产堆的技术特性、运行经验和技术改进。

二、汉 福 特 生 产 堆

1944—1955年分三期建造投产的八座汉福特生产堆——B, D, F, C, H, DR, KE和KW堆都是石墨慢化、轻水冷却、天然铀再加若干0.95% U^{235} 的稍加浓缩为燃料的产钚堆，是工艺管道呈水平布置的卧式堆。这些堆在设计原理、堆体结构、冷却方式、工艺运输方面大体相似；但在功率水平、工艺管、燃料元件、屏蔽材料、水质处理方面逐渐有所改进。图1示出汉福特生产堆的外貌〔6〕。

B, D, F堆是美国第一批生产堆，设计功率为250兆瓦。始建于1943年，B, D堆于44年达到临界，F堆于45年投产，B堆于68年关闭，其间有两年没有运行，实际运转22年，D堆运转23年，F堆运转20年。

C, H, DR堆分别于47, 49和50年投产，设计功率1000兆瓦。C堆运转24年，H堆16年，DR堆14年。

KE和KW堆均于55年投产，71年关闭，运转16年。设计功率为1000兆瓦。按照工艺孔道的数量推断，实际功率可能更高些。这两个堆均有较大的改进。据文献〔17〕称，这是两个具有特殊用途的反应堆。

（一）堆体结构

1. 石墨砌体

B, C等早期的汉福特反应堆，本体均是一个大的石墨立方体，高、宽约30呎（约9.14米）〔6〕。四周有坚实的屏蔽，石墨砌体是由石墨块组成的石墨柱构成。石墨块的尺寸为4呎×4呎×48吋〔7〕。栅格间距8.375呎（21.3厘米）〔6〕。K堆（KE和KW堆）砌体，高、宽各41呎（12.497米），前后距离33.5呎（10.214米），由3.75呎×3.75呎×44吋的石墨块砌成。工艺管道按正方栅距排列。石墨做慢化剂、反射层，同时也是堆本体主要的结构材料。石墨不仅要达到核纯和具有足够的机械强度，而且要在较高温度和辐照作用下具有良好的尺寸稳定性，这关系到工艺孔道和控制棒孔道的垂直程度，对工艺管的插拔、控制棒的抽插以及燃料元件长度的限制均有直接影响。因此对砌体的设计、选材、安装和监测要求十分严格。

石墨在辐照场中产生核发热, 尽管有些热量散失, 但绝大部分砌体的温度仍在 100°C 以上。通过控制石墨孔壁与工艺管的间隙, 借助调节传热介质的成分和流量均可部分地调节砌体的温度, 尽量使其平坦化。过高的温度会导致产品质量的降低, 带来氧化和热膨胀等问题。汉福特反应堆采用传热最好的氦气做传热介质, 通过加入不同数量的 CO_2 或氮改变氦气的纯度来调节砌体的温度。这种干燥的惰性气体兼做石墨氧化的抑制剂和工艺管泄漏的监测介质。

2. 工艺孔道

汉福特生产堆的工艺孔道呈水平布置。B、C等堆有2004个工艺孔道, KE和KW堆各有3200个工艺孔道。水冷的B、C控制棒从反应堆一侧水平插入堆内。安全棒悬于堆顶, 无冷却, 靠自重插入堆内。第三安全系统硼钢球位于堆上管道内, 在特殊情况下通过底阀自动落入堆内。在反应堆的另一侧有同位素生产孔道和试验孔道。孔道布置参看图2^[7]。

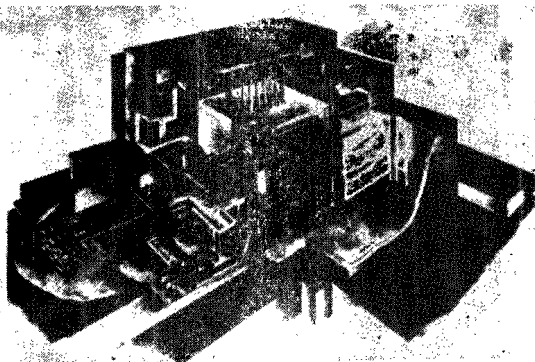


图2 汉福特生产堆堆体剖视图

3. 工艺管

工艺管既是冷却剂的通道, 又是燃料元件的承重构件。它的使用寿命和可靠程度直接影响反应堆的利用率、产品产量、运行的安全性和堆体寿命。

早期的汉福特生产堆采用铝管做工艺管。工艺管内径约1.68吋(~ 42.7 毫米)^[7], 内壁有两条底肋支撑元件。工艺管沿反应堆前后方向抽插, 活性区部位装燃料元件, 其余部位装燃料定位架。

K堆于1963年大部分孔道改用锆-2合金工艺管。其外径1.806吋(45.9毫米), 内径1.725吋(43.8毫米), 最小壁厚0.035吋(0.89毫米), 长48呎(14.6米)。这种工

艺管使用至1970年未因材料缺陷而引起损坏。

4. 燃料元件

早期汉福特生产堆使用天然铀铝包壳棒状元件，直径36.57毫米，长220.98毫米；铀芯直径34.5毫米，长度203.67毫米^[22]。为了尽量减少堆内的水量，增加后备反应性，工艺管与元件之间的环隙仅有0.09吋（2.3毫米）宽^[8]。

五十年代末全部改为管状燃料元件（图3），外径1.5吋（38.1毫米），内径0.375吋（9.53毫米），长8吋（203.2毫米），重8磅（3.63公斤）。天然铀加若干0.95%U²³⁵的稍加浓铀作燃料，铝作包壳。K堆采用自立式管状元件，外径1.5吋（38.1毫米），冷却水内流道孔径0.5吋（12.7毫米）。这种管状元件可使比功率提高；使元件径向燃耗的不均匀状况得到改善；消除了棒状元件中心的高温区；可使燃料得到合理的较为充分的利用。但制造工艺较为复杂。

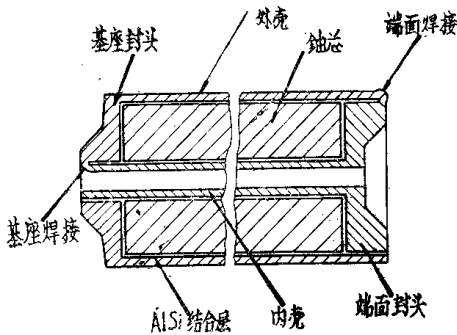


图3 套管燃料元件

应当指出，早期的燃料元件包壳用2S铝（美国牌号1100），即工业纯铝。六十年代初改为含1%Ni，0.5%Fe的Al—Ni—Fe合金（X8001），这种合金在250℃的动水和静水中均有较高的耐蚀性。美国曾在热功率300兆瓦，温度217℃的实验沸水堆Borox—IV中做过考验，又在阿贡实验沸水堆中做过15个月的考验，其中有40%的时间，堆温在250℃，结果良好，而2S铝则多用于170℃以下的水冷堆中^[22]。

5. 控制棒、安全棒和安全球

控制棒 用B₄C做吸收剂，铝做包壳，水冷却。控制棒从堆的一侧抽插，这对调节堆内的通量分布较为有利，可使燃料元件沿活性区轴向的燃耗较为均匀。

安全棒 是用B₄C填充的硼钢棒，正常运行时由电磁铁吸住悬于堆顶部位，当安全电路断开时靠重力落入活性区，用于紧急停堆和长期停堆。不冷却。

安全球 是直径0.375吋（9.53毫米）的硼钢球，在地震和其它意外事故引起孔道发生弯曲时，它能确保反应堆停闭。

反应堆长期停闭时插入60—80根附加吸收棒。

K堆有41根碳化硼—硼钢棒从堆顶插入，控制反应堆。有20根可燃毒物棒从堆的侧、后插入，补偿燃耗引起的后备反应性的变化。

6. 堆体屏蔽

反应堆以铸铁作热屏蔽层，以3.75吋（~95毫米）厚的钢板，4.5吋（~114毫米）厚的栲索奈特纤维板作生物屏蔽层。堆顶用混凝土防护。KE和KW堆采用重混凝土作生物屏蔽。反应堆典型的屏蔽状况如图4所示^[6]。

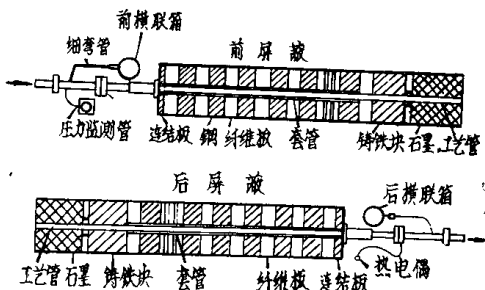


图4 堆体屏蔽与工艺管道示意图

（二）工艺冷却系统^[6,7]

汉福特生产堆采用直流方式冷却。反应堆运行过程中放出的热量用哥伦比亚河水进行冷却。河水在进入工艺管前需经过滤和有效的净化，以减少矿物质和其它有害杂质，这些物质可能引起反应堆有关部件的腐蚀破漏，工艺管壁和元件包壳的腐蚀与结垢，妨碍传热与阻滞冷却剂的流动，并在通过活性区时发生活化使污水的比放射性增高。

工艺水的流程示于图4和图5。用一组水泵将河水抽送到过滤设备，使它在水处理站经过净化，加缓蚀剂重铬酸钠，调节pH值至6.9—7.1之后，通过两组高压大流量工艺水泵按要求的压力和流量向反应堆供水，水先经过一个大水池流进两个大直径的进水集流管，再分配到各个水平的分组集流管（前横联箱），通过工艺管头的水嘴流进各个工艺管。每根工艺管的流量用一个文丘利管测量，文丘利管同时还可以监测压力。工艺水通

过活性区后，经过监测出口水温的热电偶短管，进入出水分组集流管（后横联箱），汇集到出水总集流管，排入一个下水池，由一个大直径的下水管把水引至斜坡上形成人工瀑布，或者通过带小孔的平板使水溅落，加速散热。再经过大管道泄入滞留池，在此停留 1—3 小时待短寿命的放射性同位素衰变到允许剂量后，靠重力排入哥伦比亚河进行稀释。

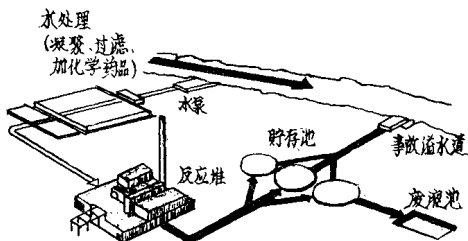


图 5 工艺水流程图

（三）控制保护系统^[7-9]

1. 控制系统

汉福特生产堆设有水平控制棒、垂直安全棒和第三安全系统—硼钢球。水平控制棒与工艺管成 90° ，用于展平通量，补偿温度效应，维持堆的正常运转，启动或停闭反应堆。B、D、F、DR堆采用水力驱动，C、H和KE、KW堆采用蓄电池作后备的电力传动。安全棒靠重力下插。安全球靠自动跌落。

单根控制棒和安全棒的最大控制能力约为 $0.3\% \Delta K$ 。水平控制棒总的控制能力，需要在氙毒完全衰变和保证抽出所有安全棒的条件下，仍能保证反应堆不会超临界。安全棒的控制能力为 $3\% \Delta K$ 。

每根工艺管的流量（压力）测量仪表引入反应堆的安全保护系统，当流量（压力）降低时自动停堆，还设有当总流量降低时停闭反应堆的附加安全装置。

在安全保护系统中至少装有三套中子通量测量装置，任何两套的停堆信号符合时就能使堆快速停闭。如果由于疏忽将通量测量装置停用而少于三套时，反应堆会自动快速停闭。此外，还配有周期警告信号和电流计次临界监测器作为辅助的核监督装置。电流计的信号来自一个（或一个以上）的独立电离室。

2. 保护系统

周期保护 除低功率外，提棒时周期应大于 30 秒。若周期小于 15 秒，考虑到操

纵员来不及控制功率水平的变化，反应堆自动停闭。周期整定与功率水平有关，在高功率下引起保护动作的周期比低功率下长一些。

功率保护 作为操纵员失误，探测器灵敏度不够，预计误差或周期计故障而引起的短周期的后备。

堆的保护系统采取“三取二”的线路。为了预防仪表失灵，至少有两套仪表随时都能使安全保护系统动作。由于在改变仪表量程和调整保护整定值时，有一套仪表必须与保护线路断开，因此第三套仪表此时必须处于工作状态。要保证任何时刻安全保护线路中都不少于两套中子探测仪表。

保护措施之一，是调整中子探测系统的最大功率保护整定值只略高于运行水平。电离室放在堆周围不同的位置上，以便在有通量畸变时提供符合实际情况的总功率，并在局部区域比功率过高时引起保护动作。

为了保证堆的安全，必须保证连续冷却，如果堆有冷却间断的危险，那么安全保护系统就通过失去压力和失去泵电源的信号而立即停堆。在单根工艺管流量不稳定时亦能引起停堆。

3. 监测系统

汉诺特生产堆设有中子通量探测器、功率记录仪、设备供电故障记录仪、压力和流量监测仪表、元件破裂监测器、温度记录仪、 γ 剂量监测器和地震仪。这些仪器互有关联。在三套测量装置中有两套的停堆信号符合时，或四套当中有二套以上同时发生故障，将使反应堆1#安全保护系统动作，垂直的安全棒落入堆内使堆停闭，这种紧急停堆称为“快速停堆”。万一在某种情况下反应堆没有按预定的时间停下来，硼钢球系统将自动打开底阀，落入堆内，使堆停闭。

4. 安全特点

(1) 在大型的石墨慢化和多控制棒的反应堆中，在通量分布最不利的畸变情况下，单根控制棒和安全棒的最大控制能力仅约 $0.3\% \Delta K$ ，因此，即使反应堆已处于缓发临界状态，不当心抽出任何一根控制棒也不会达到瞬发临界条件。由于设计保证反应堆在满装载的条件下，不插入安全棒而只插入水平控制棒可使反应堆处于次临界状态，因此在停堆状态下未经许可从堆内抽出几根安全棒亦不会达到临界，只是安全控制的后备有所减少。

(2) 水平控制棒在有停堆信号时可以同时插入，但在抽出时要用手动分别进行。由于使用选择开关，一次最多可以抽出4根棒。

(3) 控制与安全系统设有连锁。在安全棒未提出之前无法抽出水平控制棒，这对保证安全是十分重要的。

(4) 监测系统设有连锁，在停堆时需要将中子通量监测器转换至小量程档，以提高灵敏度。如果反应堆冷启动时由于意外操作使反应堆超临界（通量监测器处于规定的灵敏度），那么在离额定功率水平很远时就能使反应堆快速停闭。

（四）操纵运行

1. 物理启动

汉福特生产堆在初次启动时计算出安全系统的控制能力，并在启动过程中进行单根控制棒效率的刻度；进行各种燃料、靶料和预计会在堆内使用的各种强吸收材料构成的柱体反应性效应的计算；用测临界大小的方法准确地测量冷却水的反应性效应；并在干、湿两种情况下测量反应性温度系数。

2. 开堆

由于热中子反应堆的中子寿命比较长，由裂变中子和温度效应引起的反应性随时间的变化比较缓慢，因此用来补偿反应性变化和维持通量分布的控制棒系统可以进行手动操作。

在停堆时由于金属铀的温度效应使反应性瞬时突增，随后由于燃料元件中铀的累积使反应性急剧下降，反应堆进入次临界状态。如果不能在短时间（约1小时）内提升功率（“热”启动），反应堆将进入氙毒上升期（停堆后1小时—1天）跌进碘坑，反应堆只好在爬出碘坑后进行“冷”启动。

反应堆启动时允许提棒的速率与三个因素有关：

- （1）预计反应性变化及反应堆装载变化效应的精确度；
- （2）监测仪表的灵敏度及提供的信号量；
- （3）操纵员能够控制的反应性变化速度。

“热”启动 汉福特反应堆工艺规程规定，在热启动时由于装载无明显变化，反应性正在下降，可以考虑很快提出全部安全棒，然后再快速抽出补偿棒，直到相当于计算的30秒周期的剩余反应性为止。此后的提棒速率要下降到这种程度：在达到运行功率水平之前，操纵台可以完全控制功率的增长，甚至在无保护线路的情况下也可以停止功率的上升。

“冷”启动 此时装载情况可能已有很大变化。工艺规程规定，此时在接近临界时要采取“什么也不信”的原则。垂直安全棒不准用最大的速率提出，反应性提升速率限制在每分钟1% ΔK ，每次只提出2根安全棒。在所有安全棒全部提出后，要按照提安全棒时同样的“视在周期”抽出水平控制棒，抽棒速率更要保守些，最多每次可抽4根棒。

3. 停堆

没有氙毒的停闭状态的反应堆在用水冷却时，其反应性可能比稳定运行时大1% ΔK 。短期停堆插入控制棒即可。如果停堆时间长，反应性接近于控制棒的补偿能力，必须插入垂直安全棒。如果还需要装入附加的中子吸收体，可使垂直管道内的硼钢球落入堆内。当有控制元件不能使用时，还可加入临时的控制元件，汉福特生产堆曾在安装硼钢球系统时使用过60—80根附加吸收棒。反应堆停闭后，投入次临界监测器测定反应堆的次临界反

应性。当反应堆停闭一段时间后再启动时，每次都要记录运行中反应性的变化，并用经验法校核。

4. 换料

汉福特生产堆前后都有升降机。装卸燃料元件是在停堆和降低水压的情况下操作的。先用手将工艺孔道两端的端盖取掉，在装料机将新燃料元件从堆前推入时，辐照过的燃料元件就同时被推入到堆后的卸料水池中。卸料水池深约20呎(6.1米)，水起保护工作人员的生物屏蔽作用和冷却铀块的作用。经过90—120天，当燃料元件中的裂变产物衰变到散出的热量和放射性水平达到可以装入防护容器送去后处理的程度，就将铀块装到有铅衬的火车容器里，运送到后处理工厂，提取钚和其它同位素。

(五) 水质控制^{6, 7, 12}

1. 水质要求

水质控制是水冷反应堆的一个重要问题。汉福特生产堆为防止工艺管和燃料元件的过度腐蚀、破损、严重结垢影响传热，阻流使元件破损，杂质活化使水的比放射性增高，排污困难等情况，因而对冷却水的处理和水质的控制提出了相当严格的要求。由于反应堆采取直流冷却方式每天耗水量很大，水厂运行费用很高，从经济角度着眼，对水处理进行了大量的试验研究工作，在1957年水处理工艺做过改进。

1956年汉福特反应堆水处理的典型流程示于图6。河水经过处理之后的工艺水质标准列于表2。水处理用的化学药品及其作用列于表3。

2. 工艺水的处理

工艺水的生产主要是河水经过凝聚、沉淀、过滤和加入缓蚀剂等处理工序。必须加入的凝聚剂、助凝剂或助滤剂的数量是由工艺水在堆内的影响因素决定的。经验证明，只经明矾处理过，含重铬酸钠的水达到结垢膜形成速率很低这个要求，腐蚀速率和排污水放射性水平总是令人满意的。因此，根据结垢膜形成速率控制工艺水质，将为反应堆带来良好的工艺效果。结垢膜的形成速率是通过测量堆内结垢膜的生长情况来监测的，结垢膜的形成速率与工艺水的混浊度有关。

水中铁含量过高会增加结垢膜的形成速率。混浊物过多会使工艺管和燃料元件表面磨损和增加结垢膜的形成速率。锰具有感生放射性。为保证工艺水中的铁含量低于0.03 ppm，混浊物低于0.20 ppm，在水中加入硫酸铝作凝聚剂使呈负电荷胶状粒子形式存在的杂质形成絮状物，沉淀过滤排除。

使用硫酸铝的主要优点是可能采用活性硅石和奎佩劳—2610作助凝剂和助滤剂，这样在低温凝聚效率大幅度下降时和河水混浊物高的时候，仍可保证凝聚和过滤的速率。

由于天然水表面有藻类植物，这种微生物的繁殖会妨碍水的过滤，因此在水槽口加氯做为抑藻剂。由于氯离子的存在会加速铝的腐蚀，对氯离子的浓度要加以限制。实验结果表明，在含有2 ppm重铬酸钠的工艺水中，氯离子浓度低于0.20 ppm时，几乎没有氯离

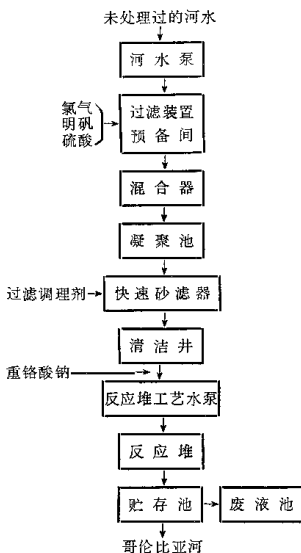


图 6 汉福特反应堆水处理流程图

表 2 工艺水质技术标准

成 分	最 大 浓 度, ppm
铁	0.03 (0.005—0.03)
混浊物	0.20 (0.02—0.20)
氯离子	0.20
重铬酸钠	2.0±1.0
pH	6.9—7.1 (水温10℃测量)

表3 水处理化学药品一览表

名 称	牌 号	作 用
硫酸铝	103或124	凝 聚 剂
硅 酸 钠	113	助 凝 剂
硫 酸	116	调 节 pH 值
奎 佩 劳 2610	—	助 滤 剂
氯	104	抑 藻 剂
石 灰	108	改善结垢膜的形成特性
氢 氧 化 钠	19	“
重 铬 酸 钠	112或123	缓 蚀 剂
硅 藻 土	125	去 膜 剂

子引起的腐蚀现象。

工艺水pH值的控制非常重要，它直接影响铜和铝的腐蚀和结垢膜的形成速率。pH值在6—8的范围内铝的腐蚀随pH值的增加而增加，点蚀却随pH值增加而减少。pH值在6.6—7.5的范围内铜的腐蚀不是很严重的问题。降低pH值会增加结垢膜的形成速率。综合考虑，确保安全的pH值选定为6.9—7.1。一年内大部分时间水中加入一定量的硫酸，既可调节pH值，又能提高凝聚效率。为了控制结垢膜的形成速率，在过滤后适当地加入少量碱，但加碱过后应接着加入酸中和，以维持pH值在给定的范围。

经过凝聚、过滤之后，将缓蚀剂重铬酸钠连续加入反应堆冷却水中，使其瞬时浓度达到 2.0 ± 1.0 ppm，日平均浓度为 2.0 ± 0.2 ppm。加入缓蚀剂可以减弱工艺管局部点蚀。在未加缓蚀剂的反应堆中，腐蚀现象明显地表现在工艺管未装料段的点蚀加速，保护层局部脱落，元件和工艺管的严重点蚀。

一、在工艺水中即使只有极低浓度的二价铬、铜、锰、铁、铅、汞、硼存在，对铝的腐蚀、结垢膜的形成、堆的反应性、排污水的放射性都有很大的影响，因此对于加入的化学药品都要经过严格的挑选。

3. 水处理的改进

1957年后在水处理方面做了如下改进：

(1) 由于过滤水中铁的浓度与悬浮物质的含量之比是一个常数，所以改为用总的含铁量来衡量水质，使分析时间由3小时减到5秒钟，精确度比原来还高。

(2) 在原水中不加助凝剂，改加过滤器调理质（是一种聚合电介质）。

(3) 改变原设计中过滤层的布置，增加了3吋厚的过滤砂层。

(4) 提高沉淀池的水位，使过滤器水位增高，压头加大，提高过滤效率。