

CNIC-00678
SINRE-0036

CN9300211

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

高通量工程试验堆(HFETR)
回路系统运行方式的改进

IMPROVEMENT OF OPERATING METHOD ON HFETR
PRIMARY COOLING SYSTEM
(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre



吴英华：中国核动力研究设计院研究员级高级工程师。1958年毕业于东北工学院工业企业电气化专业。

Wu Yinghua, Executive engineer of Nuclear Power Institute of China. Graduated from North-East Engineering Institute in 1958, majoring in electrization for industry enterprise.

CNIC-00678

SINRE-0036

高通量工程试验堆(HFETR) 回路系统运行方式的改进

吴英华 蔡会江 林继森

强辉 吴桂仙

(中国核动力研究设计院,成都)

摘 要

讨论了利用 HFETR 回路水力特性对回路系统运行方式进行改进。根据实测数据,给出了系统阻力计算结果。计算结果表明:加大堆芯燃料元件装载和降低主泵转速以降低主回路流量,既可使反应堆低功率运行,节约能源,又可满足同位素生产和燃料元件、材料考验的需要。介绍了回路系统改进措施,并比较了改进后带来的经济效益。

IMPROVEMENT OF OPERATING METHOD ON HFETR PRIMARY COOLING SYSTEM

(In Chinese)

Wu Yinghua Cai Huijiang Lin Jisen

Qiang Hui Wu Guixian

(NUCLEAR POWER INSTITUTE OF CHINA, CHENGDU)

ABSTRACT

By using the characteristics of primary cooling system on HFETR (high flux engineering test reactor), the improvement of operating method is discussed. Based on the actual measured data, the calculating results of system resistance are presented. The results showed that the increase of the charge of fuel elements and the decrease of flow rate in primary cooling system by decreasing rotating speed of main pumps would lead a decrease of operating power, save energy and meet the demand of isotope production and test of fuel elements and materials. The main measures for improving the primary cooling system and the economic benefit owing to the improvement are introduced.

引言

HFETR 设计功率 125MW, 每年开六炉, 每炉运行 25~30 天。由于 HFETR 元件、材料考验任务不饱满, 每年只开 2~3 炉。这样开堆时间过短, 有些需要经常性生产的中、短寿命同位素产品以及单晶硅辐照任务就无法满足要求。根据 HFETR 目前承担的任务, 如果反应堆在 25~55MW 功率下运行, 则既能满足^{99m}Tc 生产和单晶硅中子掺杂要求, 又能满足^{113m}In 和¹⁹²Ir 生产要求, 在全年运行积分功率不变的条件下, 不会影响⁶⁰Co 生产及燃料元件、材料考验任务。

原设计的 HFETR 运行方式仅为高功率运行。由于主泵设计扬程与系统阻力匹配不好, 运行时只能开 3 台主泵或 4 台主泵。如果主回路大流量, 而反应堆低功率运行, 对能源是极大的浪费, 所以反应堆只好高功率运行。

能否对回路系统加以改造而实现反应堆低功率运行? 前提是要解决低功率运行的经济性。本文就主回路系统改造及改后经济效益进行论述。

1 利用回路水力特性进行改造

HFETR 由于采用套管型元件, 流道间隙小, 阻力较大, 在额定流量下, 元件盒进出口压差可达 0.5MPa。由于堆芯部件 γ 发热严重, 因此要有相当水量冷却堆芯部件。另外考虑元件装载变化的灵活性, 有许多部件是采取装配式的, 所以部件在下栅板上的间隙较大, 造成多处缝隙泄漏, 在 40 盒元件装载下, 通过元件盒内的流量只有 48.2%。

HFETR 冷却系统 5 个并联的单元, 共有 5 台主泵和 5 组共计 10 台热交换器, 正常运行时, 3 组或 4 组热交换器工作。由于堆芯元件装载变化较大, 为了满足不同装载下堆芯流速 10m/s 的要求, 在主回路上设置了蝶阀和旁通阀调节入堆流量, 这两种调节方法是损失能量的。

我们利用回路水力特性进行改进。采取的办法如下:

(1) 增加堆芯燃料元件装载以减少堆芯部件缝隙流量的相对份额。40 盒元件装载缝隙流量占总流量的 51.8%, 而 80 盒元件装载缝隙流量占总流量的 35%, 不仅如此, 增加元件盒装载也相当于使 2、3 级泵房及辅助设备所消耗电能相对份额减少。

(2) 在回路系统一定条件下, 回路消耗功率是流量的三次方关系。如果降低流量至 1/2, 则回路消耗功率只有原来的 1/8, 反应堆允许热功率正比于入堆流量, 所以在相同反应堆积分功率下, 低流量是节能的。

(3) 关闭旁通阀取消旁通流量; 全开蝶阀取消蝶阀阻力。

实现(2)、(3)最好的办法是将主泵转速由 1500r/min 降至 1000r/min。

2 计算的基本依据与假设条件

2.1 系统阻力用实测参数

在堆芯元件盒数为 40 盒, 3 组冷却回路运行, 测得参数如表 1。

表 1 40 盒元件时主回路参数

蝶阀开度	旁通阀开度	入堆流量, t/h	堆进出口压差, MPa	主泵扬程, MPa
30°	全关	4650	0.50	0.86
90°	全关	4650	0.50	0.70

表 1 中蝶阀全开时主泵扬程数据系根据蝶阀的 $K-Q$ 曲线求得, 当入堆流量为 4650t/h 时, 系统阻力为 0.70MPa。

2.2 母管支管压降分配

设计给出满功率(4 泵)运行时, 总流量为 5600t/h, 母管阻力为 0.2 MPa; 支管流量为 1400 t/h, 支管阻力为 0.148MPa; 换算成 3 泵并联总流量为 4650t/h, 母管阻力为 0.138MPa; 支管流量为 1550 t/h, 支管阻力为 0.182MPa。

由表 1 可知 3 泵运行系统阻力为:

$$\Delta P_{\text{母管}} = 0.70 - 0.50 = 0.20 \text{ MPa}$$

按理论计算值正比折算, 母管阻力为 0.086MPa, 支管阻力为 0.114MPa。

2.3 假设条件

考虑到元件盒下接头与栅板间隙泄漏量比铝块下接头与栅板间隙泄漏量大, 所以每多装一盒元件需增加 60t/h 流量, 才能维持元件盒内流速为 10m/s。

由于热交换器振动等原因, 限制每组冷却回路流量不大于 1700t/h。

堆芯元件装载加大后, 认为轴向、径向不利因子不变。

大量计算表明, 堆所发的最大热功率正比于通过元件盒的流量。

3 阻力计算

根据上面的结果, 主系统流量为 4650t/h 时的母管、支管阻力按系统阻力正比于流速平方关系, 计算出 1~5 组主泵运行; 堆内装载 40, 60, 80, 100 盒元件条件下的系统阻力。绘制成系统阻力与流量关系曲线, 见图 1。

图 1: 主泵降速后特性曲线 $H=f(Q)$ 与系统阻力特性曲线 $\Delta P=f(Q)$ 。

①~⑤——1 至 5 组主泵在 40, 60, 80 盒元件的阻力特性曲线 $\Delta P=f(Q)$;

⑥——主泵叶轮直径为 $\phi 540\text{mm}$, 转速为 1000r/min 时主泵特性曲线 $H_2=f(Q_2)$;

⑦——主泵叶轮直径 $\phi 580\text{mm}$, 转速为 1000r/min 时主泵特性曲线 $H_1=f(Q_1)$ 。

表 2 3 泵并联特性(叶轮直径 $\phi 580\text{mm}$)

$Q_0, \text{t/h}$	7434*	6695*	5600	5100	4500	4000	3500
$Q_1, \text{t/h}$	4981	4486	3752	3417	3015	2680	2345
H_0, MPa	0.679	0.826	1.010	1.054	1.098	1.135	1.167
H_1, MPa	0.301	0.367	0.449	0.469	0.488	0.504	0.519

*: 从叶轮切割后数据修正得到。

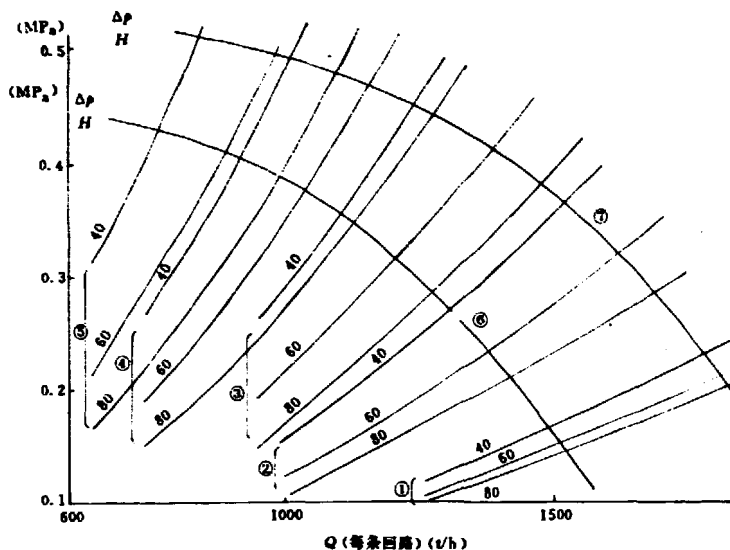


图1 主泵降速后的特征曲线

计算结果表明:采用堆芯燃料元件大装载及使主泵降速的办法来降低主回路流量,既可使反应堆低功率运行;又可达到节能的目的。

4 回路系统改造方案实施

4.1 实施原则

- (1) 保留原运行方式的可能性;
- (2) 考虑全力生产同位素大装载的需要;
- (3) 考虑经济性、可行性。

4.2 降低转速后水泵特性变化

主泵转速为 1000r/min 时的流量 Q_1 与扬程 H_1 由主泵叶轮直径为 580mm, 转速为 1500r/min 的流量 Q_0 与扬程 H_0 计算得出, 见表 2。

主泵叶轮切割为 $\phi 540$ mm 后, 转速由 1500r/min 降至 1000r/min 时的流量 Q_2 与扬程 H_2 由主泵叶轮 $\phi 540$ mm, 转速 1500r/min 的流量 Q_0 与扬程 H_0 计算得出, 见表 3。

表3 3泵并联特性(叶轮直径 $\phi 540$ mm)

$Q_0, t/h$	2825	3228	3632	4116	4519	5400	6000
$Q_2, t/h$	1884	2153	2423	2745	3014	3602	4000
H_0, MPa	1.012	0.984	0.952	0.914	0.876	0.716	0.588
H_2, MPa	0.449	0.436	0.424	0.406	0.388	0.318	0.261

降低转速后主泵特性曲线见图1。根据主泵特性曲线和系统阻力特性曲线找出工作点流量和扬程。

4.3 回路系统功率计算

水泵轴功率由下式给出：

$$N_g = \frac{\gamma QH}{\eta}$$

式中： γ ——介质密度，水的 $\gamma=1000\text{kg/m}^3$ ；

Q ——工作点流量， $\text{m}^3/\text{h}=\text{m}^3/3600\text{s}$ ；

H ——工作点扬程，MPa；

η ——水泵的总效率，%。

4.4 改进方案

从表4可知，如将主泵改为1000r/min，主泵叶轮为 $\phi 580\text{mm}$ 时，主泵功率为146~219kW。主泵叶轮为 $\phi 540\text{mm}$ 时，主泵功率为83~174kW。

表4 回路系统功率计算结果

冷却回路组数	元件盒数	主泵叶轮 $\phi 580\text{mm}$				主泵叶轮 $\phi 540\text{mm}$			
		主泵流量 t/h	主泵扬程 MPa	主泵效率 %	主泵功率 kW	主泵流量 t/h	主泵扬程 MPa	主泵效率 %	主泵功率 kW
5组	40	4213	0.51	56	213	3070	0.43	53	174
	60	4880	0.49	63	211	4490	0.41	59	173
	80	5480	0.475	67	216	4963	0.39	64	168
	100	5940	0.46	70	217	5318	0.37	66	166
4组	40	4044	0.49	64	215	3706	0.40	60	172
	60	4650	0.46	69	215	4190	0.375	66	165
	80	5112	0.44	71.5	218	4524	0.35	69	160
	100	5426	0.42	72.5	218	4770	0.32	70	151
3组	40	3735	0.45	71	219	3330	0.36	68	163
	60	4140	0.41	73	215	3640	0.315	70.5	150
	80	4420	0.38	73	213	3850	0.28	71.5	140
	100	4620	0.35	72	208	3990	0.26	72	133
2组	40	3040	0.36	72	211	2640	0.27	72	138
	60	3240	0.32	71	203	2780	0.23	73	122
	80	3360	0.29	70	193	2850	0.21	73	114
	100	3430	0.27	70	184	2900	0.19	73	105
1组	40	1780	0.23	68	167	1500	0.16	72.5	92
	60	1800	0.21	67	164	1515	0.15	72	88
	80	1810	0.20	67	150	1530	0.14	72	83
	100	1830	0.19	66	146	1540	0.14	72	83

(1) 电动机功率的计算

$$P_{\text{电}} = k \cdot N_{\text{主}}$$

为使水泵起动快和安全,取系数 $k=1.2$ 。这样,电动机功率应大于 263kW。

(2) 电动机选取

可选用 JS-148-6 型高压电机,功率 310kW,6000V,电机轴的一端与主泵相联,另一端仍装飞轮,即原有 800kW 电机的飞轮。

(3) 主泵改进试验

为了进行试验,将已有的 215kW,399A,380V,1000 r/min 电机用于拖动 5 号主泵,主泵叶轮 $\phi 580\text{mm}$,堆内 60 盒元件,系统蝶阀全开,旁通阀全关。实验结果:流量为 1690 t/h;泵扬程 0.18MPa;水泵功率 169kW;电机功率 184kW;电机电流 341A。与理论计算比较见表 5。

表 5 5号主泵参数(主泵叶轮 $\phi 580\text{mm}$)

	流量, t/h	扬程, MPa	电机功率, kW
实测值	1690	0.18	184
计算值	1800	0.21	178*

*: 电机功率 $P=N_{\text{主}}/0.92$, kW。

在 5 号主泵改电机成功后,将 1 号、2 号、3 号泵电机用已有的 310kW,6000V,1000r/min 电机(单端伸轴,故未加飞轮)更换。换后单泵试验,主泵叶轮直径 $\phi 540\text{mm}$,堆内 60 盒元件,系统蝶阀全开,旁通阀全关,测得数据见表 6。表 7 给出 3 泵并联运行数据。

表 6 单泵运行(主泵叶轮 $\phi 540\text{mm}$)

	流量, t/h	扬程, MPa	电机功率, kW
实测值	1540	0.14	143~170
计算值	1515	0.15	96

表 7 1号、2号、3号泵并联运行(主泵叶轮 $\phi 540\text{mm}$)

	流量, t/h	扬程, MPa	电机功率, kW
实测值	3600	0.32	(143~170)×3
计算值	3640	0.315	163×3

通过上述数据说明,计算值与实测值符合较好,证明改进是成功的。

4.5 二次冷却水系统改进

由于主回路流量下降,3 泵运行时堆功率只能开到 55MW,2、3 级泵房各一台泵运行流量仍偏大,因此对 2、3 级泵房水泵叶轮各切割 20%。切后,3 级泵房单泵运行流量 3000t/h,电机功率约为 170kW;2 级泵房水泵运行流量 2400t/h,电机功率约 170kW。叶轮切割后能满足冷却的需要。

由于2级泵房水泵叶轮的切割,水量减少,对应所需水费也在减少,粗略估算水泵运行所交的水费与水泵运行电费相当,所以可折算成电功率进行计算。

5 经济效益比较

5.1 节能效益

以反应堆运行 $1\text{MW} \cdot \text{d}$ 所消耗电能为考核指标。

1984年第一次节能改造中,3级泵房改为24SA-18G水泵,配310kW高压电机,取消出口总管节流孔板,减少0.3MPa压降的损失;一回路主泵进行叶轮切割,由 $\phi 580\text{mm}$ 切至 $\phi 540\text{mm}$,取消泵出口节流孔板。

1988年下半年回路系统运行方式改造,主泵电机由1500r/min改为1000r/min,电机功率由原来的500kW降至170kW。2级、3级泵房水泵叶轮切割,电机功率分别由280kW和310kW降至170kW。

回路改造前后堆系统耗能比较见表8。

由前所述,以每年运行 $6000\text{MW} \cdot \text{d}$ 计算,电价每 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 为0.15元。1988年回路运行方式改造后与1981年耗电比较,每年节约电费约124万元;与1984年耗电比较,每年节约电费约46万元。节能效果显著。

表8 反应堆系统耗能比较

堆功率	50MW	73.5MW	50MW(冬)	50MW(夏)	26MW
运行年份	1981年	1984~1987	1988年	1988年	1988年
每 $\text{MW} \cdot \text{d}$ 耗电, $\text{kW} \cdot \text{h}$	2073.6	1200	634	739	874
以81年耗电归一	1	0.579	0.306	0.356	0.421
以84年耗电归一		1	0.528	0.616	0.728

5.2 为反应堆低功率运行创造了条件

主泵电机转速更改后,可任意组合,增加反应堆运行灵活性,为堆芯大装载、低流速、间断运行创造了条件。

入堆总流量可在670t/h、1700t/h、2000t/h、2800t/h、3700t/h、4200t/h、4500t/h甚至更高的流量下运行。

在回路运行方式改造完成后,正是1988年底乐山地区供电紧张,全院只分配给3000kW电量,1号点只能供给2200kW。如果不改变运行方式反应堆将需用电4000kW,这样将无法保证反应堆运行。只有用改造后的一台主泵和一台事故泵运行,用电刚好是2000kW,这样反应堆才能按时运行,保证 ^{90}Tc 同位素的供货,赢得了信誉。

只有回路运行方式改造后,才能实现反应堆每月两次低功率运行,这样为同位素生产和单晶硅辐照创造了良好的条件,使民品产值逐年有明显的增加。1987年为336.8万元;1988年为504.3万元;1989年为711万元;1990年为834万元。

5.3 余力生产同位素

当需要全力生产同位素时,可将主泵叶轮全部换成 $\phi 580\text{mm}$,堆芯装载元件80盒以上,则入堆流量可达:4组冷却回路为5400~5600t/h,5组冷却回路为5700~6000t/h。这样已达到回路运行的极限,可满足全力生产同位素的需要。

5.4 堆芯大装载小流量还可:

- (1) 减轻燃料元件高速水流冲刷,可提高安全裕量或加深燃料元件损耗。
- (2) 有足够的后备反应性,可多装铀靶,多生产 ^{60}Co ,降低 ^{60}Co 成本。
- (3) 自从改进回路运行方式后,即使使用了大量零功率元件和保存水池长期存放的卸料元件,也未发生过燃料元件破损信号,证明这种运行方式对安全有利。

6 结束语

从1988年下半年开始改变HFETR运行方式至今已有两年半的时间了。通过运行实践证明,这种运行方式是可靠的,安全是有保证的,因此在燃料元件考验任务没上马之前,这种运行方式应该是HFETR的最佳运行方式。

高通量工程试验堆(HFETR)

回路系统运行方式的改进

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

中国核情报中心核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 6 千字

1992年9月北京第一版·1992年9月北京第一次印刷

ISBN 7-5022-0783-X

YL·502

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



ISBN 7-5022-0783-X
TL - 502

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre