

5MW 低温供热反应堆微沸腾运行 启动可行性研究

陈 新 明 高 祖 瑛

(清华大学核能技术研究所 103 室, 北京)

文章用 RETRAN-02 程序, 对清华大学核能技术研究所设计和建造的 5MW 低温供热堆的微沸腾运行启动方式进行了较为系统的研究, 分析了控制反应堆引入速率、主回路蒸汽冷凝量大小及主回路对外总传热量大小对启动稳定性的影响。结果表明, 在一种新颖的启动方式下, 只要对反应堆的某些特定参数作适当的实时控制, 反应堆就能从单相向两相微沸腾运行方式稳定过渡。

关键词 低温供热堆, 反应堆启动, 两相密度波振荡。

一、前 言

清华大学核能技术研究所设计和建造的 5MW 低温供热堆有两种工作方式, 即: 1.5 MPa 系统压力下的单相压水自然循环运行方式和 1.5 MPa 系统压力下的两相微沸腾自然循环运行方式。两者相比, 后者具有热工参数更高的优点, 特别是在利用该堆低温发电方面, 微沸腾运行方式可以大大地提高发电效率。

5 MW 低温供热堆主回路系统工作在低压条件下, 反应堆微沸腾运行启动过程中, 主回路如何避开两相密度波振荡、从低压单相自然循环向低压两相微沸腾自然循环稳定过渡, 是一个重要的研究课题。

实验及计算结果均表明^[1]: 自然循环状态下, 稳定性边界点的堆芯入口过冷度随系统压力的升高而升高, 而且在较低的功率密度下, 系统有较好的稳定性能。鉴此, 提出了利用电加热或反应堆低功率压水运行方式加热, 使堆内建立约 1.0 MPa 的蒸汽分压之后, 在较低的入口过冷度条件下, 再进行微沸腾运行启动的设想。无疑, 这种启动方式, 对于低压下避开两相密度波振荡, 是一个建设性的新颖设想。堆外回路实验也证明了该点。

基于上述启动设想, 本文利用先进的 RETRAN-02 程序对低温供热堆的微沸腾运行启动方式进行了可行性分析。

二、程序及分析模型

RETRAN-02 程序是目前国际上公认的最先进的轻水堆分析程序之一^[2]。对 5MW 低温供热堆堆外实验回路的验证性计算表明^[1], 该程序亦可比较准确地用于低温低压下的热工水力学分析。

图 1 为 5MW 低温供热堆主回路的结构示意图, 表 1 列出了该堆的主要结构参数。

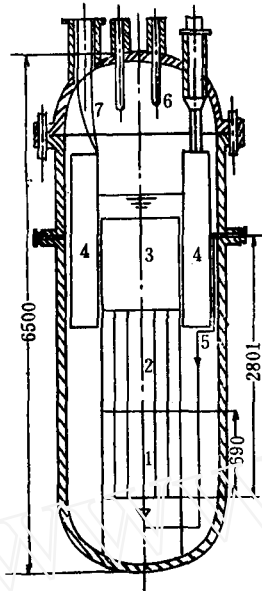


图 1 5 MW 供热堆
Fig.1 5 MW heating reactor

1——堆芯；2——通道烟囱；3——公共烟囱；4——换热器；5——注硼管；6——棒位探测器；7——测量引管。

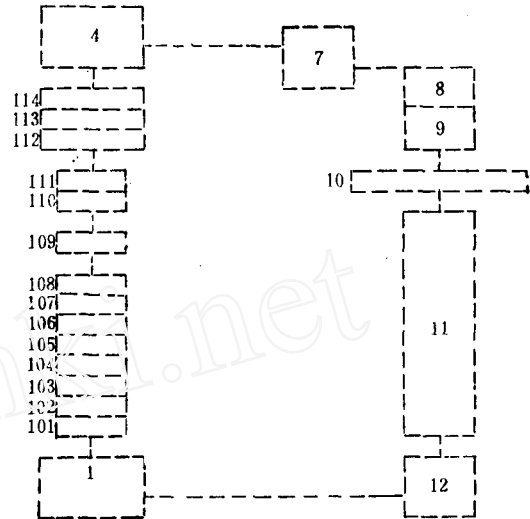


图 2 反应堆主回路数值分析模型
Fig.2 The mode of numerical analysis in the primary coolant system of reactor

控制体说明，1 为下腔室；101—108 为活性区；109 为堆芯出口段；110—114 为烟囱段；4 为上腔室；7—9 主换热器；10 为主换热器出口联箱；11—12 为下降管。

表 1 5MW低温供热堆主要结构参数

Table 1 Key structural parameters of 5MW LTHR

活性区高度 /m	燃料元件数 /盒	每盒燃料 元件总数 /根	燃料元件总数 /根	堆芯平均入 口阻力系数	烟囱总高度 /m
0.69	12/4	96/35	1292	25	2.31

计算中将其划分为 25 个控制单元(图 2)，其中堆芯分为 8 段，堆芯出口 1 段，烟囱分为 5 段。计算中两相流动采用代数滑移模型，堆芯中子空泡份额采用过冷沸腾模型计算。

三、微沸腾运行启动的计算分析

5 MW 低温供热堆的微沸腾运行启动过程分为启动前准备阶段和反应堆启动向两相微沸运行转化阶段。第一阶段的目的是维持反应堆主回路为 1.0 MPa 左右的蒸汽分压和入口低过冷度的自然循环流动状态。第二阶段则是反应堆提升功率，同时向两相微沸腾自然循环转化的启动过程。

1. 准备阶段

准备阶段可采用两种方案：电加热或反应堆压水低功率运行加热。

计算中准备阶段采用了反应堆压水低功率运行加热方案。该方案包括反应堆压水 0.5MW 低功率运行、反应堆停堆、排不凝结气体(上空腔压力从 1.47 MPa 降至 1.14MPa)、排主回路系统载热剂这四个阶段。

停堆后 2075 s, 主回路总排水量为 1.097 t, 反应堆主要运行参数示于表 2。其中, N 为反应堆热功率, P_4 、 T_4 为反应堆上空腔压力和温度, T_1 为反应堆下联箱温度, ΔT_{in} 为堆芯入口过冷度, T_{109} 为堆芯出口温度, $\dot{M}_{101}$ 为堆芯入口流量, α_c 为堆芯中子平均空泡份额, α_{114} 为烟囱出口段空泡份额, L_4 为反应堆上空腔液位(以烟囱出口为基准)。以此刻的运行参数作为反应堆启动向两相微沸腾转化的初始状态。

表 2 反应堆运行参数
Table 2 Operating parameters of reactor

N /MW	P_4 /MPa	T_4 /°C	T_1 /°C	ΔT_{in} /°C	T_{109} /°C	$\dot{M}_{101}$ /kg·s ⁻¹	α_c /%	α_{114} /%	L_4 /m
0.0815	1.055	182.4	180.8	1.6	183.4	7.25	1.06	0.0942	0.30

2. 微沸腾运行启动阶段

考虑到 5 MW 低温供热堆微沸腾运行的特性, 计算首先从一种理想的启动方案入手, 继而系统地分析了主回路热量积累、反应堆控制反应性引入速率及冷凝器传热量对微沸腾运行启动的两相流动稳定性的影响。

(1) 理想的微沸腾运行启动方案

着眼于:

- 1) 维持上空腔的压力基本不变, 也就是使上空腔的汽泡积累量为零;
- 2) 启动初期相对较快地引入正反应性, 较快地提高堆功率, 减弱空泡负反应性的反馈对堆功率的影响, 提供足够的热量适应自然循环流量增大造成的载热能力的增加, 使得堆功率、空泡份额和自然循环流量单调地上升;
- 3) 保证堆芯入口温度基本不变, 这主要是要求主回路载热剂的热积累率为零。

因此, 理想的启动方式为:

$$\text{冷凝量: } Q_c|_t = (N - \dot{M}_{101} \cdot C_p \cdot \Delta T_{in})|_{t-10s} \quad (1)$$

$$\text{换热量: } Q_t|_t = (\dot{M}_{101} \cdot C_p \cdot \Delta T_{in})|_{t-10s} \quad (2)$$

控制反应性引入速率: 0.03\$/4s × 20步。

其中 C_p 为定压比容(kJ/kg·°C)。

由于载热剂从堆芯流入上空腔的时间约为 10s, 故式(1)和(2)右部各量都取的是 t 时刻前 10 s 的值。

计算结果示于图 3—6。由图可见, 运行时间 40 s 后(堆功率约为 0.14MW), 堆功率、

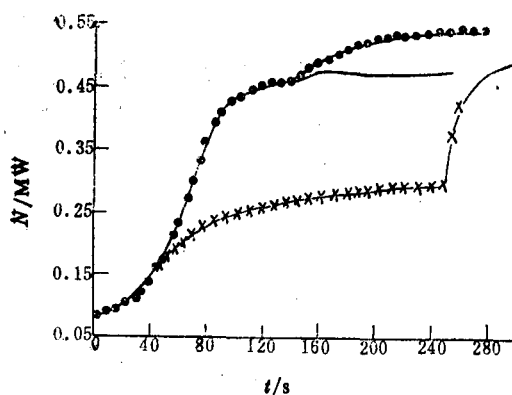


图 3 反应堆功率
Fig.3 Reactor power

●—20步; ×—10步; —理想状态。

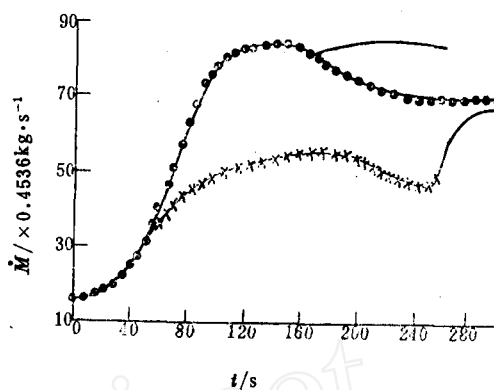


图 4 堆芯入口质量流量
Fig.4 Mass flow at core inlet

●—20步; ×—10步; —理想状态。

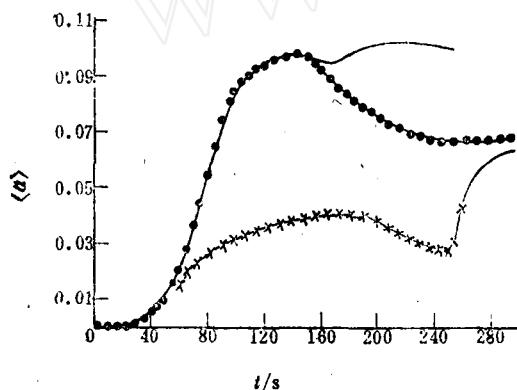


图 5 烟囱平均空泡份额
Fig.5 Average void fraction in riser

●—20步; ×—10步; —理想状态。

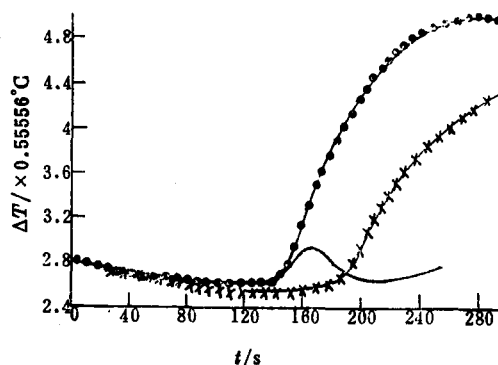


图 6 堆芯入口过冷度

Fig.6 Subcooling degree at core inlet

●—20步; ×—10步; —理想状态。

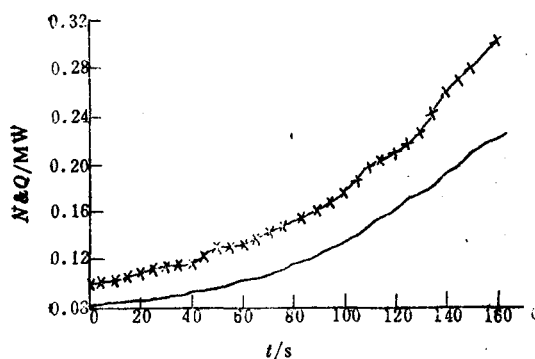


图 7 功率和主换热器传热量
Fig.7 Power and heat transfer of heat-exchanger

—功率; ×—热交换。

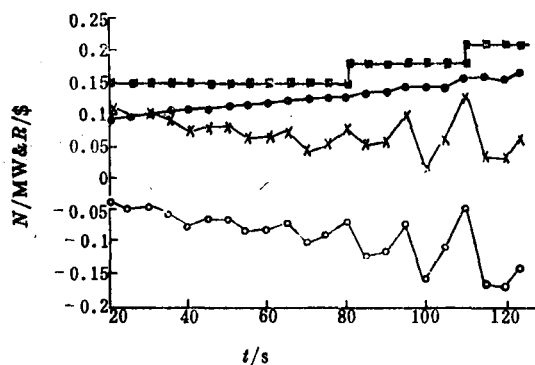


图 8 功率和反应性

Fig.8 Power and reactivity

●—功率; ×—反应性; ○—空泡反应性; ■—控制反应性。

主回路系统流量、堆芯及烟囱内的空泡份额开始明显增加。两分钟后变化趋于平缓,反应堆顺利进入两相微沸腾自然循环运行状态。启动过程中,系统流量平稳地从初始的 7.25 kg/s 增加到 38 kg/s,系统的压力及堆芯入口过冷度变化很小。结论:这种启动方式相当稳定。

(2) 主回路载热剂热量负积累对微沸腾运行启动两相流动稳定性的影响

5 MW 低温供热堆没有设计独立的冷凝器,微沸腾运行时,反应堆上空腔液位基本不变,因此冷凝和换热量的比例是确定的,不可能保证理想启动方式那样的冷凝与换热的比例关系。在冷凝与换热量为 30% 和 70% 的比例下,启动初始时只着眼于保证上空腔压力基本不变,直到 250 s 左右,当反应堆已基本运行在两相微沸腾状态时,再将主回路传出的总热量转为跟随堆功率的变化,以保证主回路中热积累率为零。即:

$$0 \sim 250 \text{ s: 冷凝量 } Q_c|_t = (N - \dot{M}_{101} \cdot C_p \cdot \Delta T_{in})|_{t-10} \quad (1)$$

$$\text{换热量 } Q_e|_t = (70\%/30\%) Q_c|_t \quad (3)$$

$$250 \text{ s} \sim \text{冷凝量 } Q_c|_t = 30\% \cdot N|_{t-10} \quad (4)$$

$$\text{换热量 } Q_e|_t = 70\% \cdot N|_{t-10} \quad (5)$$

控制反应性引入: 0.03 \$/4s × 20 步(方案 1)

0.03 \$/4s × 10 步 + 0.3 \$(250 s 时)(方案 2)

图 3—6 中给出了该方案 1 和方案 2 的各参量的曲线。由图中可见,主回路载热剂热量的少量负积累对堆芯入口温度的影响有个相对较长的滞后过程,滞后时间取决于主回路的系统流量。反应堆在此段时间内如能基本进入两相微沸腾运行状态,其流动稳定性不受影响。

值得一提的是,方案 2 中,250 s 时突然引入 0.3 \$ 的正反应性,(相当于补偿棒提了一步半或调节棒连续跳了 10 步),反应堆仍维持良好的状态,这充分表明,5 MW 低温供热堆在两相微沸腾运行时,仍具有很好的自调节能性。

(3) 控制反应性引入速率的影响

反应堆启动中控制反应性的引入是最关键的步骤。在反应堆安全启动所要求的控制反应性引入速率的范围内,讨论了另两种控制反应性的引入速率对启动稳定性的影响。分析表明,在低功率区间,反应性的引入速率对微沸腾运行启动的稳定性有很大的影响。

$$\text{传热方式: 冷凝量 } Q_c|_t = (N - \dot{M}_{101} \cdot C_p \cdot \Delta T_{in})|_{t-10} \quad (1)$$

$$\text{换热量 } Q_e|_t = (70\%/30\%) Q_c|_t \quad (3)$$

1) 控制反应性的引入: 0.03 \$/16s × 10 步。其功率及对外总传热量示于图 7。可见,这种控制反应性的引入速率是可行的,启动方式是稳定的。

2) 控制反应性引入: 0.03 \$/4s × 5 步,60 s 后再按 0.03 \$/30 s 的速率引入控制反应性,(参见图 8)。由于在稳定性较差的低功率区间内反应性引入速率太慢,空泡反应性振荡对功率的影响起了主要作用,故这种方式的启动失稳。

结论:功率从 0.14—0.25 MW 区间,若外加控制反应性引入速率太慢,而空泡反应性的变化对功率的影响起主要作用,则主回路很可能发生两相密度波振荡。

5 MW 低温供热堆微沸腾运行启动阶段,其空泡核反馈系数约为 -0.185 \$/1%。启动初期,堆芯中子平均空泡率 20 s 的振荡幅度不大于 0.08%,也就是说,20 s 内空泡反应性的变化幅度不大于 0.015 \$。因此,低功率区间保证控制反应性的引入速率大于 0.03 \$/20s。

是必要的。

(4) 冷凝量对微沸腾运行启动稳定性影响的敏感度

主回路冷凝量的大小对 5MW 低温供热堆微沸腾运行启动的稳定性有很大的影响。通过计算分析进一步研究微沸腾运行启动稳定性对冷凝量变化的敏感度是有必要的。假设冷凝量有 $\pm 20\%$ 的超调, 即:

$$Q_{c,i} = K \cdot (N - \dot{M}_{101} \cdot C_p \cdot \Delta T_{in})|_{t-10s} \quad (6)$$

取系数K分别为0.8和1.2。

$$\text{换热量: } Q_{i,i} = (70\%/30\%) Q_{c,i} \quad (3)$$

控制反应性引入: $0.03 \$/4s \times 20$ 步

计算结果示于图 9-11。可见, 冷凝量有 $\pm 20\%$ 的超调时, 启动也是稳定的, 而且, 冷凝量稍小, 也就是说上空腔压力在启动过程中略有增高, 对启动的稳定性是有贡献的。特别重要的是图 11 的压力变化曲线显示, 只要控制上空腔的压力波动不超过 ± 0.03 MPa, 启动过程就处于稳定区间之内, 这为实际的启动控制提供了可能。

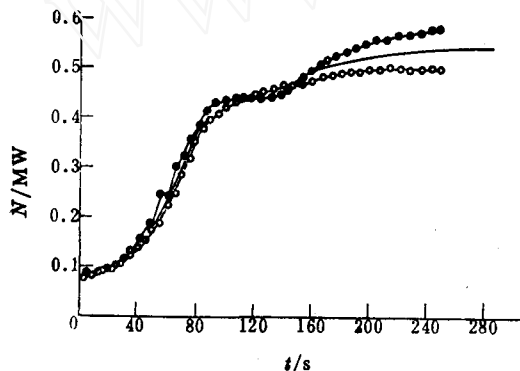


图 9 反应堆功率

Fig.9 Reactor power

● — $k=1.2$; — $k=1.0$; ○ — $k=0.8$ 。

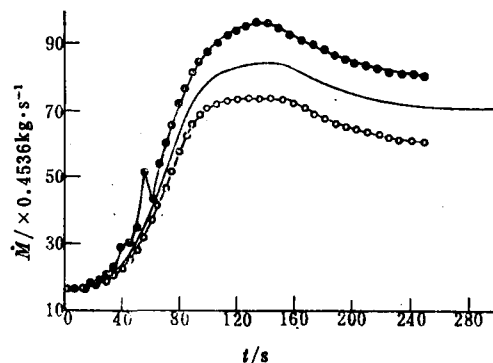


图 10 堆芯入口质量流量

Fig.10 Mass flow at core inlet

● — $k=1.2$; — $k=1.0$; ○ — $k=0.8$ 。

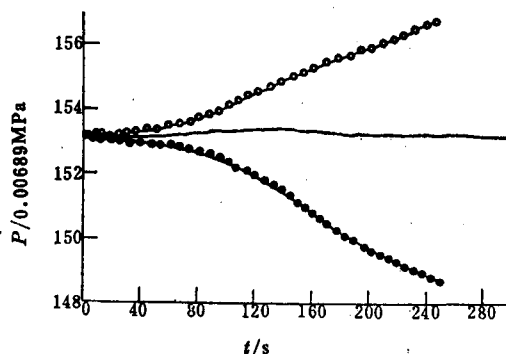


图 11 反应堆上空腔压力

Fig.11 Pressure in upper space

● — $k=1.2$; — $k=1.0$; ○ — $k=0.8$ 。

四、结 论

1. 5 MW低温供热堆分阶段进行微沸腾运行启动的设想是必须的, 也是可行的。
2. 5 MW 低温供热堆微沸腾运行启动的 两相 流动稳定性主要取决于冷凝量的大小和控制反应性的引入速率。而主回路载热剂热量的负积累对启动稳定性的影响不大。
3. 在堆功率从 0.14 MW 上升 为 0.25 MW 区间, 只要控制反应性的引入速率不低于 0.03 \$/2 0s, 反应堆上空腔压力波动不超过 ± 0.03 MPa, 反应堆就可以向两相微沸腾运行方式稳定过渡。
4. 堆功率大于 0.25 MW 后, 冷凝量对两相流动稳定性的影响大大减弱, 对控制反应性的引入速率亦无下限限制。
5. 5 MW低温供热堆在两相微沸腾运行状态具有良好的自调节功能。

参 考 文 献

- [1] Gao Zuying, Li Jincai, Cheng Lu et al., Analysis of Stability in a Low Pressure Two-Phase Natural Cycle System, 2nd Inter. Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer, 21-24 June 1989, Xian, China.
- [2] RETRAN-02 A Program for Transient Thermal Hydraulic Analysis of Complex Fluid System, EPRI NP-1850-CCM, May 1981.

(编辑部收到日期: 1990年6月5日)

THE POSSIBILITY RESEARCH ON LOCAL BOILING STARTUP OF 5 MW LTHR

CHEN XINMING GAO ZUYIN

(Division 103, Institute of Nuclear Energy and
Technology, Tsinghua University, Beijing)

ABSTRACT

Using RETRAN-02, the paper researches systematically the ways of local boiling startup of 5 MW Low Temperature Heating Reactor (LTHR), designed and built at Institute of Nuclear Energy and Technology (INET) of Tsinghua University. The affect of startup stability by the rate of control reactivity insertion, the amount of vapour condensation of the primary collant system and the amount of heat transfer of the primary coolant system are analysed. The result shows that, by a new type of mode of startup, the reactor can transit stably from single phase natural cycle to two-phase local boiling natural cycle mode, as long as some special parameters of the reactor are controled temporarily.

Key words Low temperature heating reactor, Startup of reactor, Oscillation of two-phase flow density waves.