

低温供热堆断电事故(ATWS)分析

高祖瑛 李金才 钱力克

(清华大学核能技术研究所, 北京)

文章利用 RETRAN-02^[1]对清华大学在建 5 MW 低温核供热实验堆断电事故(ATWS)进行了分析, 比较了两种注硼模型, 给出了事故过程描述、计算方案及计算结果。

关键词 低温供热堆, 断电事故, ATWS。

一、前言

清华大学核能所正在建造一座 5 MW 低温核供热实验堆, 它是微沸腾、自保压、一体化布置、自然循环冷却方式的低温低压堆型。在结构设计、动态特性等许多方面不同于普通的压水堆和沸水堆。关于该堆的动态特性及安全分析, 还是一个新课题。本文对该堆在断电事故情况下的瞬态行为进行了分析。断电事故指反应堆系统丧失全部外电源, 同时耦合反应堆控制系统失控, 无法依靠控制棒停堆的假想工况。尽管这类事故发生概率极低, 但由于丧失外电源导致整个系统全部循环泵停止工作, 可能造成较严重的事故后果。因此, 在安全分析中必须予以足够的重视。

二、5MW 低温供热堆简介

5 MW 低温供热堆全部主系统部件布置在压力壳之内, 壳上部汽空间为维持主系统运行压力的自保压空间(参见图 1)。堆热功率为 5 MW, 主回路压力为 1.47 MPa, 堆芯入口水温 186.2 °C, 冷却剂流量 75.3 kg/s, 堆芯上部提升段(常称烟囱)出口平均蒸汽含量为 0.008。压力壳顶部设有安全阀, 事故过程中, 当堆壳内压力超过某一限定值时, 安全阀会自动开启泄压。当压力降到某一限定值时, 安全阀可自动关闭。安全阀的有关设计参数为: 额定排放流量 0.55 kg/s, 排放面积 2.29 cm², 开启压力 1.72 MPa, 回座压力 1.62 MPa。

注硼管由储硼罐引出, 经由压力壳侧壁上部进入压力壳内, 直通堆芯底部。事故过程中, 当保护系统给出停堆信号, 而控制系统失控未能停堆时, 则启动注硼系统, 将硼水由堆芯底部注入堆芯。注硼系统有关参数为: 流量 0.28 kg/s, 硼液浓度 21000 ppm, 硼液引入反应性为 $-0.00018\Delta K \cdot K^{-1}/\text{ppm}$ 。

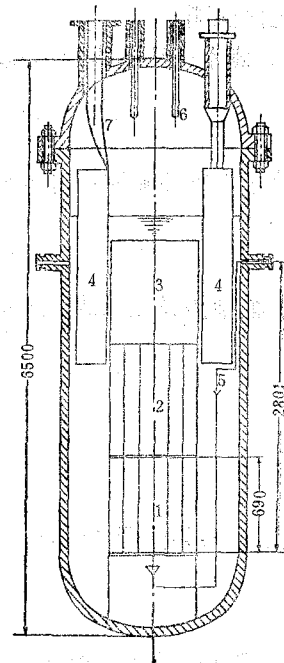


图 1 5 MW 供热堆
Fig.1 5 MW
heating reactor

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。

三、事故过程描述及分析模型假定

1. 事故过程描述

反应堆负荷运行, 由于外部电源断电造成两个回路系统同时被切除, 二回路系统丧失冷却能力, 主系统水温和压力升高, 进而导致主回路流量、冷却剂密度、堆功率等各项参数均发生变化。当参数变化超过保护系统停堆信号整定值时, 保护系统给出停堆信号。假定由于控制系统故障, 反应堆无法依靠控制棒停堆。当主回路系统压力升至安全阀动作压力时, 安全阀开启, 压力壳内蒸汽向排放水箱排放, 壳内压力下降。当压力降至安全阀回座压力以下时, 安全阀关闭。此过程持续至注硼系统动作, 硼水进入堆芯使反应堆安全停堆。

2. 分析模型假定

本文在动态分析中采用两个回路系统的模型。分析中作了如下假定: 1. 事故发生前, 反应堆运行在102%额定功率水平上, 即5.1MW。

2. 堆正常运行时间1s, 二回路系统突然被隔离, 二回路流量在1s内降为零。

3. 保护系统给出停堆信号而未能停堆, 则在安全阀开启后100s, 注硼系统动作, 向压力壳内注硼。

4. 硼水由注硼罐到达堆芯底部的延迟时间为40s。

四、注硼模型

为了考察注硼速度对事故动态的影响, 分析中采用了快速注硼和慢速注硼两种模型。

1. 快速注硼模型

本模型假设注入硼水由主回路流量直接裹挟进入堆芯。堆芯入口处硼浓度由下式计算:

$$C_{B,in} = \frac{M_B}{M_B + M_{in}} C_{Bo} \tag{1}$$

式中 M_B 为注硼流量, C_{Bo} 为由硼罐流出的硼水浓度, M_{in} 为堆芯入口流量。

2. 慢速注硼模型

本模型假设注入硼水首先进入堆芯底部下联箱, 与下联箱水混合均匀后再进入堆芯。认为注入硼水与下联箱水瞬时混合均匀, 则堆芯入口处硼浓度为:

$$C_{B,in} = \frac{\int (M_B C_{Bo} - M_{in} C_{B,in}) d\tau}{W_L} \tag{2}$$

式中 W_L 为下联箱水的总体积。

3. 堆芯平均硼浓度计算

在计算堆芯平均硼浓度时，作了如下假设：

1. 进入堆芯的硼液与堆芯水瞬时混合均匀；
2. 不计轴向权重；
3. 自进硼时刻开始，当流入堆芯的质量小于堆芯初始质量时，认为无硼从堆芯流出；
4. 流出堆芯的硼量按堆芯平均硼浓度计算。

由上述假设得到堆芯平均硼浓度计算公式：

$$\tau < \tau_1 \text{ 时, } C_{B,C} = \frac{\int_{\tau} M_{in} \cdot C_{B,in} d\tau}{W_c} \quad (3)$$

$$\tau > \tau_1 \text{ 时, } C_{B,C} = \frac{\int_{\tau} M_{in} \cdot C_{B,in} d\tau - \int_{\tau-\tau_1} M_{out} \cdot C_{B,C} d\tau}{W_c}$$

式中， $C_{B,in}$ 为堆芯入口处硼浓度， M_{in} 为流入堆芯的主循环流量， W_{out} 为流出堆芯的主循环流量， W_c 为堆芯水总质量， τ_1 为由硼液进入堆芯开始，至流入堆芯的质量等于堆芯水初始时刻总质量所用的时间。 τ_1 由下式计算：

$$\int_{\tau_1} M_{in} d\tau = W_c(0) \quad (4)$$

$W_c(0)$ 为零时刻堆芯水总质量。

4. 循环硼水进入堆芯的滞后时间

在注硼初始时刻，只有储硼罐注入的流量 M_B 中含有浓度为 $C_{B,0}$ 的硼水，而主系统循环流量 M_{in} 中不含硼。但当主系统流量经过一个循环后，再进入堆芯的主系统流量 M_{in} 中就含有浓度为 $C_{B,c}$ 的硼水。此后，计算堆芯入口处硼浓度公式(1, 2) 应分别改为：

$$C_{B,in} = \frac{M_B \cdot C_{B,0} + M_{in} \cdot C_{B,c}}{M_B + M_{in}} \quad (5)$$

$$C_{B,in} = \frac{\int (M_B \cdot C_{B,0} + M_{in} \cdot C_{B,c} - M_{in} \cdot C_{B,in}) d\tau}{W_L} \quad (6)$$

根据该堆稳态设计^[2]可以推算出，压水微沸腾方式5.1MW时，含硼水循环一周再次进入堆芯的滞后时间约为102 s。作为保守估计，在分析中忽略主循环流量中可能的硼浓度。即在注硼后任一时刻，均采用式(1) 或(2) 计算堆芯入口硼浓度。

五、计算方案、计算结果及分析

本文对三种方案，即事故后不注硼、快速注硼和慢速注硼进行了计算。

1. 不注硼工况

图2及图3给出了此种工况的部分参数变化曲线。从图中可以看出，由于外电源丧失，二回路停泵，主回路系统丧失冷阱，导致主系统压力上升，由于压力引起的正反应性反馈使堆功率上升。运行38.1s时，主系统压力达到1.72MPa，安全阀开启。138.1s保护系统给出注硼信号。若注硼系统不动作，约291s时堆壳压力降至1.62MPa，安全阀回座。此后压力回升，308.5s时安全阀再次开启。与压力波动相对应，堆功率也产生有规律的波动。约39.5s时，堆功率达到最大相对值1.527。此后，随堆壳压力下降而下降，290s

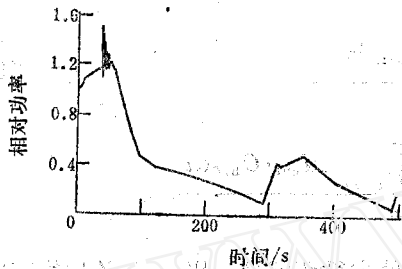


图2 不注硼，堆相对功率变化

Fig.2 No injection boron, relative power change

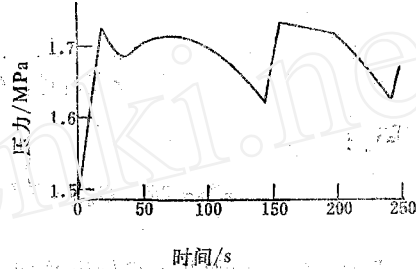


图3 不注硼，堆壳内压力变化

Fig.3 No injection boron, pressure change in reactor vessel

时，降至0.106。安全阀关闭后，堆功率开始回升。到安全阀第二次开启，相对功率回升至0.427。图2、图3表明：由于安全阀开、关而引起的堆功率波动周期约为200s，堆功率的波动幅度约在(48~6)%之间。堆功率波动滞后压力波动2s。

2. 两种注硼模型比较

图4—7给出了快速和慢速注硼过硼中堆参数变化曲线。138.1s时，保护系统给出注硼信号，40s后硼水进入堆芯。图8给出了两种注硼模型在注硼30s内的比较。可以看出，快速注硼瞬时引入堆芯的负反应性比慢速注硼大，但注硼后30s，两种模型的相对功率基本趋于一致，约为0.05。慢速注硼的壳内压力也比快速注硼下降缓慢。比较结果表明，无论采用哪种注硼模型，均可使反应堆迅速停堆，对功率后期变化过程影响不大。

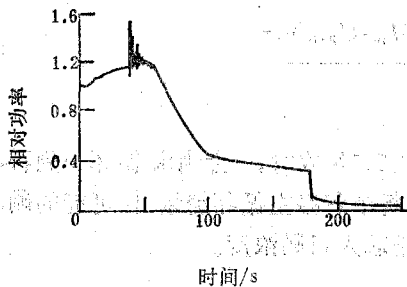


图4 快注硼，堆相对功率变化

Fig.4 Fast injection boron, relative power change

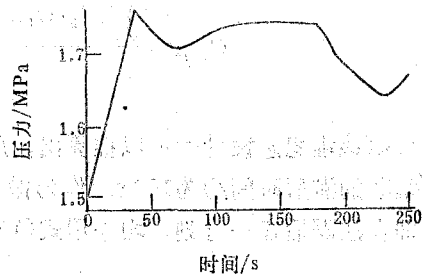


图5 快注硼，堆壳内压力变化

Fig.5 Fast injection boron, pressure change in reactor vessel

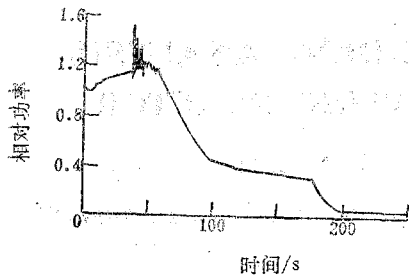


图 6 慢注硼, 堆相对功率变化

Fig.6 Slow injection boron, relative power change

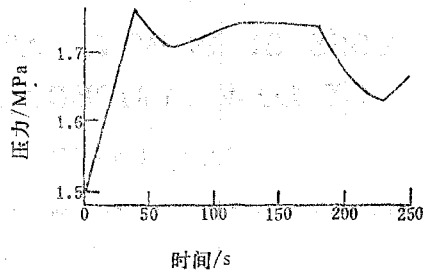


图 7 慢注硼, 堆壳内压动变化

Fig.7 Slow injection boron, pressure change in reactor vessel

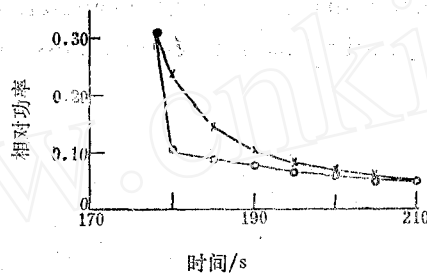


图 8 两种注硼方式比较

Fig.8 Comparison of two injection boron models

×——慢注硼; ○——快注硼。

六、结 论

1. 5 MW供热堆断电(ATWS)事故中, 随着安全阀的开启, 借助于反应堆自身负反馈效应, 可将功率维持在50%以下, 直至注硼停堆。在注硼时间上没有严格要求。
2. 最小烧毁比为2.42, 满足安全准则1.3的要求。无燃料元件破损及放射性释放。
3. 燃料径向平均最高焓值为174.4J/g, 远低于587J/g的安全允许值。
4. 燃料芯块最高温度为1234°C, 远低于安全允许限2200°C。
5. 注硼系统设计参数能够满足安全停堆要求。注硼快慢不影响停堆后果。
6. 整个动态过程中主回路冷却剂丧失量很少, 堆芯始终被水淹没。
7. 分析结果表明, 5 MW低温供热堆由于主回路采用自然循环冷却方式, 在断电事故(ATWS)这样的严重事故中, 仍然能维持堆内自然循环。同时, 该堆可依靠自身的反应性反馈特性使反应堆在相当长时间内在低功率水平下运行, 直至注硼停堆。不会发生元件烧毁、放射性泄漏的恶性后果。说明该堆具有很好的固有特性。

参 考 文 献

- [1] EPRI, NP-1850, RETRAN-02 A Program For Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems.
- [2] 高祖瑛、李金才, 5 MW低温供热试验站热工水力学设计, 清华大学核能技术研究所报告, 1988。

(编辑部收到日期: 1989年3月7日)

LOSS OF POWER (ATWS) ACCIDENT ANALYSIS OF LOW TEMPERATURE HEATING REACTOR

GAO ZUYING LI JINCAI QAN LIKE

(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, P. O. Box 1021, Beijing)

ABSTRACT

The loss of power (ATWS) accident of 5 MW low temperature heating reactor is analyzed by RETRAN 02 code. Two injection boron models are compared. The accident procedure, computing method and computational results are described.

Key words Low temperature heating reactor, Loss of power accident, ATWS.

www.cnki.net

摘要
本文采用 RETRAN 02 代码对 5 MW 低温供热堆的丧失功率 (ATWS) 事故进行了分析。比较了两种注入硼模型。描述了事故过程、计算方法及计算结果。

关键词 低温供热堆, 丧失功率事故, ATWS.