



HFETR 2000 kW高温高压考验回路主泵断电事故瞬态特性分析

刘文斌, 宋霁阳, 邓才玉, 康长虎, 向玉新, 宋雨鸽, 刘畅, 郭雨非, 邢如均

Transient Characteristics Analysis of 2000 kW High Temperature and High Pressure Test Loop of HFETR during Loss of Power Accident of Main Pump

Liu Wenbin, Song Jiyang, Deng Caiyu, Kang Changhu, Xiang Yuxin, Song Yuge, Liu Chang, Guo Yufei, and Xing Rujun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[³He辐照考验装置反应性引入事故分析](#)

Analysis of Reactivity Introducing Accident in ³He Irradiation Rig

核动力工程. 2019, 40(4): 29–31

[基于Relap5的ACME台架全厂断电整体试验数值分析](#)

Numerical Analysis of ACME Station Blackout Integral Effect Test with Relap

核动力工程. 2019, 40(3): 98–102

[CENTER燃料组件堆内辐照考验燃耗计算研究](#)

Study on Burnup Calculation of CENTER Fuel Assembly Irradiation Test in HFETR

核动力工程. 2018, 39(5): 26–28

[高温熔盐试验回路系统设计及验证研究](#)

Design and Test Study on a High Temperature Molten Salt Loop

核动力工程. 2020, 41(5): 127–131

[中国聚变工程试验堆氦冷包层安全分析研究](#)

Safety Analysis of China Fusion Engineering Test Reactor Helium Cooled Blanket

核动力工程. 2021, 42(S2): 29–32

[百万千瓦级压水堆严重事故卸压阀高温瞬态分析](#)

Analysis of High-Temperature Transients in Severe Accident Depressurization Valve of 100 MW Pressurized Water Reactors

核动力工程. 2021, 42(3): 69–74



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)03-0074-04; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.03.0074

HFETR 2000 kW 高温高压考验回路 主泵断电事故瞬态特性分析

刘文斌, 宋霁阳, 邓才玉, 康长虎, 向玉新, 宋雨鸽,
刘 畅, 郭雨非, 邢如均

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 为了研究高通量工程试验堆 (HFETR) 内 2000 kW 高温高压考验回路在主泵断电事故过程中的安全特性, 基于 RELAP5 程序建立了考验回路的仿真模型, 采用验证后的模型开展了主泵断电事故瞬态特性分析。计算结果表明, 在主泵断电事故过程中, 主泵高速工况会切换至 2 台事故泵低速工况, 流量下降较快并最终稳定至初始流量的一半, 燃料包壳在 4.34 s 达到峰值温度 763 K; 之后由于功率的不断下降, 包壳温度随之不断下降; 事故过程中最小偏离泡核沸腾比大于 1.3, 表明不会发生偏离泡核沸腾, 满足安全要求。

关键词: RELAP5; 辐照考验回路; 主泵断电事故; 高通量工程试验堆 (HFETR)

中图分类号: TL36 **文献标志码:** A

Transient Characteristics Analysis of 2000 kW High Temperature and High Pressure Test Loop of HFETR during Loss of Power Accident of Main Pump

Liu Wenbin, Song Jiyang, Deng Caiyu, Kang Changhu, Xiang Yuxin, Song Yuge,
Liu Chang, Guo Yufei, Xing Rujun

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to study the safety characteristics of 2000 kW high temperature and high pressure test loop in high flux engineering test reactor (HFETR) in the process of loss of power accident of main pump, the simulation model of test loop is established based on RELAP5 code, and the transient characteristics of loss of power accident of main pump are analyzed by using the verified model. The calculation results show that in the process of loss of power accident of main pump, the high-speed working condition of the main pump switches to the low-speed working condition of the two accident pumps, the flow rate decreases rapidly and finally stabilizes to half of the initial flow rate, and the fuel cladding reaches a peak temperature of 763 K at 4.34 s; Then, due to the continuous decline of power, the cladding temperature decreases continuously; The minimum departure from nucleate boiling ratio during the accident is greater than 1.3, which indicates that departure from nucleate boiling will not occur and meets the safety requirements.

Key words: RELAP5, Irradiation test loop, Loss of power accident for main pump, High flux engineering test reactor (HFETR)

0 引 言

2000 kW 高温高压考验回路是高通量工程试

验堆 (HFETR) 内建设的用于开展新型压水堆燃料组件设计研发的辐照回路, 其目的是为了在研

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-09-07

基金项目: 中核集团青年英才项目 (CNNC-2020-08)

作者简介: 刘文斌 (1993—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事反应堆物理-热工耦合研究, Email: lwenbin@mail.ustc.edu.cn

究堆中真实地建立燃料组件高温高压的辐照考验环境^[1]。

目前国内外对于考验回路的瞬态事故安全分析较少，胡泊等对中国绵阳研究堆（CMRR）的堆内高温回路初步设计方案开展了失流事故及其安全分析^[2]；张毅基于中国先进研究堆（CARR）高温高压试验回路开展了小破口失水事故、失流事故以及失压事故瞬态分析^[3]。以上研究主要是针对概念设计回路开展分析，具有一定局限性。

考验回路一旦发生主泵断电事故，由于流量的快速下降出现流量与功率不匹配现象，传热状况恶化，严重时可能导致燃料烧毁威胁试验堆的安全。因此本研究基于 RELAP5 程序对 HFETR 的 2000 kW 考验回路开展了主泵断电事故工况下的瞬态安全分析，以确保高温高压回路及 HFETR 在辐照过程的安全性，为考验回路多种辐照任务的顺利开展奠定基础。

1 计算模型

1.1 试验装置

2000 kW 高温高压考验回路建于 HFETR 内的辐照孔道中，其高温高压的冷却环境与 HFETR 冷却剂系统完全独立，设计压力 19.4 MPa、设计温度 623 K、额定流量 35 m³/h、额定换热功率 2000 kW，实际运行参数根据具体的辐照任务确定。

1.2 RELAP5 建模

基于最佳估算程序 RELAP5 程序^[4-5]建立了 2000 kW 考验回路的 RELAP5 完整模型，包括考验组件、换热器、稳压器、2 台主泵以及 2 台事故泵等模型，其中考验组件分别建立了平均通道和热通道，RELAP5 模型见图 1。RELAP5 热构件模型仅考虑了燃料的径向导热。

如图 1 所示，2000 kW 高温高压考验回路具有 2 台主泵和 2 台事故泵，正常运行工况下 2 台主泵中 1 台处于运行状态，另 1 台处于备用状态。

1.3 模型验证

主泵断电事故工况下，2 台主泵的外电源全部丧失，依靠不间断电源启动 2 台事故泵，因此主泵高速工况会切换至 2 台事故泵低速工况。

HFETR 2000 kW 考验回路开展了 2 路外电源断电事故工况下的主泵高速切换至事故泵低速运行的冷态试验。试验的主要内容是研究断电事故工况下主回路流量变化特性，即主泵切换至事故泵低速过程中的流量瞬态变化特性。试验时主泵初始质量流量为 1.67 kg/s、初始压力为 13 MPa。基于如图 1 所示的 RELAP5 完整模型，开展主泵断电事故工况数值模拟，其质量流量瞬态特性曲线的计算值与试验值对比结果见图 2。由图 2 可以看出，计算值与试验值吻合较好，表明所建立的 RELAP5 程序模型准确、合理。

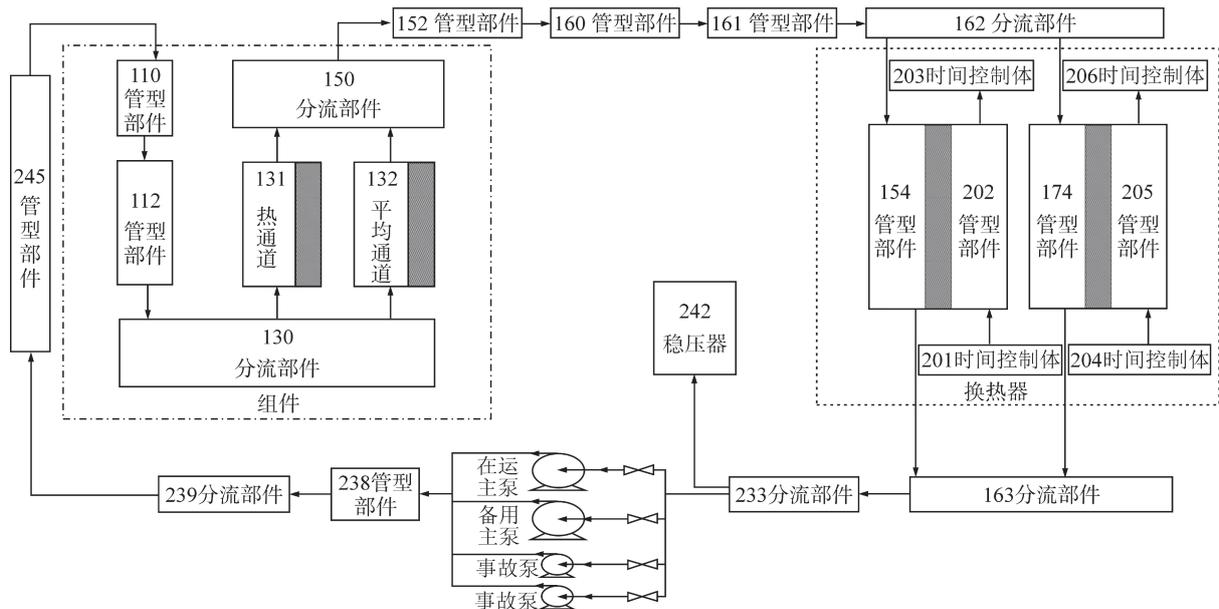


图 1 2000 kW 考验回路 RELAP5 模型
Fig. 1 RELAP5 Model for 2000 kW Test Loop

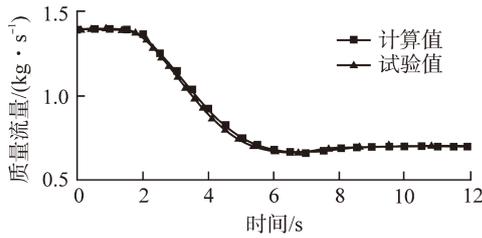


图2 质量流量的计算值与试验值对比

Fig. 2 Comparison of Calculated Value and Test Value for Mass Flow

2 计算分析

2.1 初始条件

2000 kW 考验回路设置的出口流量低安全整定值为初始流量的 80%，保守考虑取 75% 初始额定流量值开始停堆。主泵断电事故燃料组件以及回路的主要参数初始值如表 1 所示。

表 1 主要参数的初始值

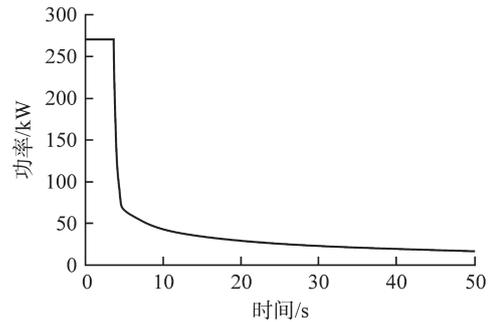
Tab. 1 Initial Values of Main Parameters

主要参数	参数值
初始核功率/kW	270
初始稳压器压力/MPa	13.7
初始入口水温/K	518
初始冷却剂流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.41
二次侧给水温度/K	297
二次侧给水流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.21
二次侧压力/MPa	0.6
主泵出口流量低整定值/% (额定值)	75
停堆信号延迟时间/s	0.25

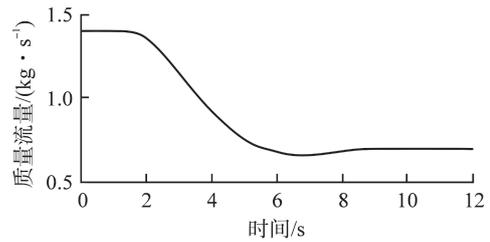
2.2 计算结果

图 3 给出了主泵断电事故工况下 2000 kW 辐照考验回路主要参数的瞬态变化特性，分别包括了功率、流量、压力、燃料芯体最高温度、燃料包壳最高温度、最小偏离泡核沸腾比 (DNBR) 以及出口水温的瞬态特性。表 2 给出了主泵断电事故过程中主要的事件序列。由图 3b 可得，0 s 两路外电源丧失导致主泵断电事故发生，直至 1.5 s 主泵仍基本保持初始流量，这是由于主泵在断电初期具有一定的转动惯量。在 3.36 s 达到初始额定流量的 75% 触发流量低停堆保护信号，延迟 0.25 s 后，即在 3.61 s 时控制棒开始下插，导致功率不断下降。由于主泵断电事故发生后回路流量降低，但功率在停堆前仍然保持较高水平，

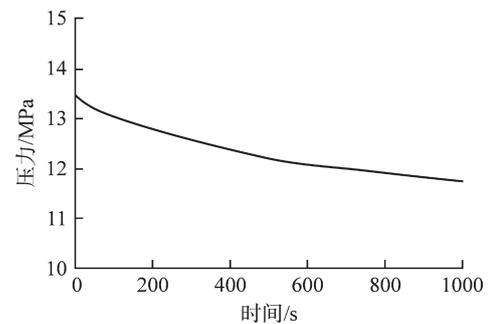
导致流量与功率的不匹配，且组件出口位置空泡份额较高，换热系数急剧降低，因此燃料包壳温度在 3.32 s 时开始不断上升，在 4.34 s 达到峰值温度 763 K。随着功率的不断下降，热通道内出口水温不断下降，包壳温度也不断降低。燃料芯体最高温度为 1666 K，小于安全限值 2863 K，这是因为在事故过程中即使流量降低，组件轴向



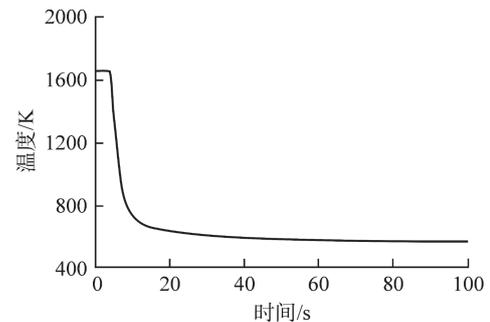
a 功率



b 流量



c 压力



d 燃料芯体最高温度

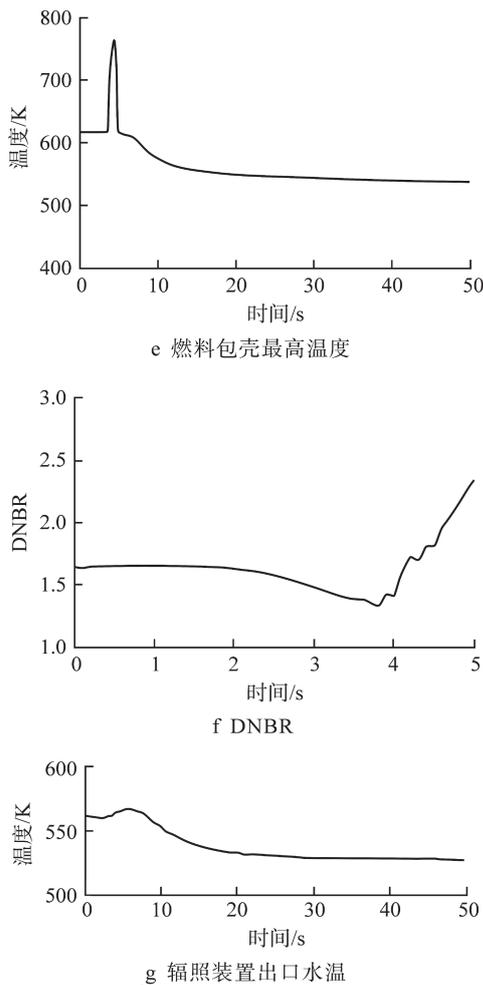


图3 主泵断电事故工况下考验回路主要参数的瞬态特性
Fig.3 Transient Characteristics of Main Parameters of Test Loop under Loss of Power Accident of Main Pump

中心位置产生汽液两相流, 但对应汽相份额较小且换热能力较好, 因此轴向中心位置的包壳温度以及芯体温度均未显著上升。事故发生后由于流量降低, 功率水平仍然较高, 导致 DNBR 不断下降, 在 3.79 s 时达到最小值 1.35, 即最小 DNBR 大于 1.3, 表明主泵断电事故过程中, 2000 kW 辐照考验回路中燃料组件是安全的。随后流量在 5.48 s 达到初始流量的 50%, 接着缓慢下降至初始流量的 47%, 在 8.6 s 后稳定保持在初始额定流量的 49% 左右, 这是因为依靠不间断电源 (UPS) 紧急启动了 2 台事故泵, 主泵会从高速工况切换至 2 台事故泵开启的低速工况。由表 2、图 3a、图 3c 和图 3g 可知, 随着功率的不断降低, 辐照装置出口水温在 5.9 s 后不断下降, 压力随之不断下降, 此后回路始终确保处于安全状态。

表 2 主泵断电事故主要事件序列

Tab.2 Main Event Sequence during Loss of Power Accident of Main Pump

事件序列	时间/s
两路外电源失电	0
流量低停堆信号产生	3.36
控制棒开始下插	3.61
DNBR达到最小	3.79
燃料包壳温度达到峰值	4.34
衰减到额定流量一半时间	5.48
辐照装置出口水温开始下降	5.90

3 结论

建立 HFETR 内 2000 kW 高温高压考验回路 RELAP5 模型, 研究了考验回路在主泵断电事故过程中主要参数的瞬态特性, 得出以下结论:

(1) 主泵断电事故过程中, 燃料芯体最高温度为 1666 K, 满足安全要求。燃料包壳在 4.34 s 达到峰值温度 763 K, 之后由于停堆后功率的不断下降, 且流量保持初始额定流量的一半左右, 导致包壳温度不断下降。

(2) 主泵断电事故过程中, 最小 DNBR 为 1.35, 确保了组件在事故工况下的安全性。

(3) 主泵断电事故发生后, 依靠 UPS 紧急启动 2 台事故泵, 确保了两路外电源断电事故工况下仍然具有至少约一半的流量, 有效保障了考验回路的安全。

参考文献:

- [1] 曹娜, 孙胜. HFETR 2000 kW 辐照考验回路节流装置设计[J]. 机械, 2016, 43(6): 63-66.
- [2] 胡泊, 郭斯茂, 王冠博, 等. CMRR 堆内高温高压辐照考验回路典型事故分析[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31(9): 096001.
- [3] 张毅. CARR 高温高压试验回路事故分析[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007.
- [4] CARLSON K E, RIEMKE R A, ROUHANL S Z, et al. RELAP5/MOD3 code manual volume III: developmental assessment problems (DRAFT): NUREG/CR-5535, EGG-2596[R]. America: EG&G Idaho, Inc., 1990.
- [5] KIM Y S, BAE B U, PARK C H, et al. RELAP5/MOD3.3 analysis of coolant depletion tests after safety injection failure during a large-break loss-of-coolant accident[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(22): 2375-2390.

(责任编辑: 杨灵芳)