

熔盐堆降功率过程中温度负反馈效应的影响研究

王 凯 陈贻炫 王超群 杨 群 袁光鹏 韩 钰 王子赟 何兆忠 赵秦财

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 反应堆温度负反馈效应是保证反应堆稳定运行的关键因素之一,对抑制反应堆温度异常升高等具有良好效果,是反应堆重要的固有安全特性之一。熔盐堆具有较大的反应性温度系数,对功率升高或排热减小等原因引起的堆芯温度升高具有良好的抑制效果。但较大的反应性温度系数会对正常运行带来一定影响,尤其是在降功率过程中。若操作过程中由于设备故障或人因等导致温度降低过大时,在温度负反馈效应的作用下,将引入较大正反应性,导致功率快速升高,可能触发安全系统整定值进而引起紧急停堆。研究降功率过程中温度负反馈效应对堆芯功率的影响,为熔盐堆运行人员的安全操作和规程制定等提供依据。采用修改后的 RELAP5/MOD4.0 程序,建立熔盐堆分析模型,模拟分析在降功率过程中不同反应性引入量、插棒速度和空气流量下堆芯功率的变化趋势。引入的负反馈越大,功率波动也会越大,越容易触发功率保护限值(120%满功率(Full Power, FP));降低反应性的引入速度可以有效降低功率波动,反应性引入越慢,功率波动越小;降低空冷空气流量能够防止功率波动触发保护限值,但无法较好地抑制功率和堆芯温度的波动幅度。降低单次反应性引入量和引入速度,并合理地调节空冷系统空气流量,能够有效降低功率的波动,避免因功率波动而触发功率保护限值。

关键词 熔盐堆, RELAP5, 降功率, 负反馈, 保护限值

中图分类号 TL99

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250471

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250471

Effect of temperature negative feedback on the power reduction process in a molten salt reactor

WANG Kai CHEN Yixuan WANG Chaoqun YANG Qun YUAN Guangpeng

HAN Yu WANG Ziyun HE Zhaozhong ZHAO Qincai

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] The negative temperature feedback effect is a key inherent safety feature of nuclear reactors and effectively suppresses abnormal core temperature rises. Molten salt reactors (MSRs) feature a strongly negative temperature coefficient of reactivity, which mitigates temperature increases caused by power rises or reduced heat removal; however, the same strong feedback can adversely affect normal operation, especially during power reduction, when an excessive temperature drop may insert significant positive reactivity, drive a rapid power

中国科学院青年创新促进会(No.E329290101)资助

第一作者: 王凯, 男, 1987 年出生, 2025 年于中国科学院大学获博士学位, 研究领域为反应堆安全分析和运行技术

通信作者: 杨群, E-mail: yangqun@sinap.ac.cn

收稿日期: 2026-01-07, 修回日期: 2026-03-14

Supported by Youth Innovation Promotion Association of CAS (No.E329290101)

First author: WANG Kai, male, born in 1987, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2025, focusing on nuclear safety analysis and reactor operation technology

Corresponding author: YANG Qun, E-mail: yangqun@sinap.ac.cn

Received date: 2026-01-07, revised date: 2026-03-14

increase, and potentially trigger safety-system setpoints. **[Purpose]** This study aims to investigate the influence of temperature negative feedback on core power during the power reduction process and to provide a basis for the safe operation and procedure development of MSR. **[Methods]** The RELAP5-TMSR code, developed on the basis of RELAP5/MOD4.0, was used to establish a MSR analysis model. Firstly, molten-salt fluid properties (e.g., nitrate salts, FLiBe and FLiNaK), heat-transfer correlations and liquid-fueled reactor models that had been validated against experiments were incorporated into the code. Then, a coupled system model consisting of the primary (fuel-salt) circuit, the secondary (coolant-salt) circuit and the air-cooling system was constructed. Finally, the core-power response during power reduction was simulated and analyzed under different reactivity insertion amounts, control-rod insertion speeds and air mass flow rates. **[Results]** Simulation analysis results show that larger single insertions of negative reactivity produce larger power oscillations and make it easier to reach the power protection limit of 120% full power (FP). At an initial power of 100% FP, insertion of -0.15% drives the power peak to the 120% FP protection limit, whereas at 80% FP an insertion of -0.3% still causes the peak to exceed 120% FP. Reducing the reactivity insertion rate effectively mitigates the oscillations: for a total insertion of -0.25% at 100% FP, lowering the control-rod speed to 80% of the design maximum keeps the power peak below 120% FP. Decreasing the air mass flow rate of the air-cooling system can also prevent the peak from reaching the protection limit (e.g., to 80% of the design flow for the same -0.25% insertion), but it does not adequately suppress the amplitudes of power and core-temperature oscillations. **[Conclusions]** During normal power reduction of a MSR, the single reactivity insertion should be limited (not exceeding 0.15% at 100% FP), the control-rod insertion rate needs to be reduced when necessary (e.g., to about 80% of the design maximum for a -0.25% insertion), and the air-cooling flow should be adjusted in a coordinated manner. These measures effectively reduce power and temperature fluctuations and help avoid unnecessary actuation of the power protection system.

Key words Molten salt reactor, RELAP5, Power reduction, Negative feedback, Protection limits

反应堆温度负反馈效应是指当堆芯温度升高时,由于一系列反应机制的作用,使得堆芯引入负反应性,进而降低堆芯功率,抑制堆芯温度的继续增加,这种效应是保证反应堆安全运行的关键因素之一^[1-2]。

熔盐堆采用液态燃料,具有利用钍燃料、能源利用效率高等优点,它是第四代核反应堆的6种候选堆型之一^[3-4]。熔盐堆具有较大的负反应性温度系数,温度负反馈效应的主要作用机制包括燃料的密度效应、多普勒效应、石墨的热散射效应以及一定的堆芯热膨胀效应^[5-6]。较大的负反应性温度系数能够有效地缓解因堆芯温度上升而导致的事故后果。但较大的负反馈对正常运行带来一定影响,尤其是降功率过程中,若在降功率过程中温度降低过快,引入的正反应性不能被下插控制棒引入的负反应性抵消,则整个过程中可能会导致功率升高,有触发安全系统整定值的可能。

当前对熔盐堆负反馈效应影响的研究主要集中在运行稳定性及事故后果两个方面,如余文等^[7]基于TREND程序对液态熔盐堆无保护反应性引入事故进行初步分析,研究表明反应堆能够利用自身的温度、功率负反馈特性有效地控制功率峰值和降低堆芯出口温度;孙暖^[8]对熔盐堆自稳性进行分析,研究结果表明,堆芯在温度负反馈作用下能够快速

达到稳定,具有较好的自稳性,模型将燃料盐流动特性和缓发中子先驱核浓度空间效应考虑在内,更加接近熔盐堆堆芯真实情况;魏泉等^[9]对液态熔盐堆运行安全特性开展初步研究,文中计算了停泵事故下的一回路系统功率和温度变化情况,计算结果表明,在额定功率停泵情况下,由于缓发中子流失减少,反应堆功率会先增加,然后由于负温度系数迅速实现功率降低,说明2 MWt液态熔盐堆具有本征安全性。本文以某型号的熔盐堆为研究对象^[10],研究了温度负反馈效应对降功率过程的影响,并对影响功率波动的因素进行分析研究,为熔盐堆运行人员的安全操作和规程制定等提供重要依据和参考。

1 熔盐堆简介

本文以某型号熔盐堆为研究对象^[10-13],熔盐堆系统示意图如图1所示,主要设计参数见表1^[10],该熔盐堆系统的正常排热系统包括三个系统,两个熔盐回路(燃料盐回路与冷却盐回路)及一个空冷系统,燃料盐回路由堆芯、熔盐-熔盐换热器壳侧、燃料盐循环泵和管路等组成。

反应堆大部分的裂变能在堆芯活性区产生,并直接传递给堆芯燃料盐,在燃料盐循环泵的驱动下,燃料盐经熔盐-熔盐换热器将热量传递给冷却盐回路,冷却盐在冷却盐循环泵的驱动下经过熔盐-空气

换热器将热量传递给空冷系统,最终热量由风机驱动的空气带入大气环境。此外,为了减轻事故后果,该熔盐堆还设置了非能动余热排出系统(Passive Reactor Vessel Auxiliary Cooling System, RVACS),

如图1所示。熔盐堆降功率过程中燃料盐回路和冷却盐回路流量保持不变,因此本文不考虑缓发中子流动效应的影响。

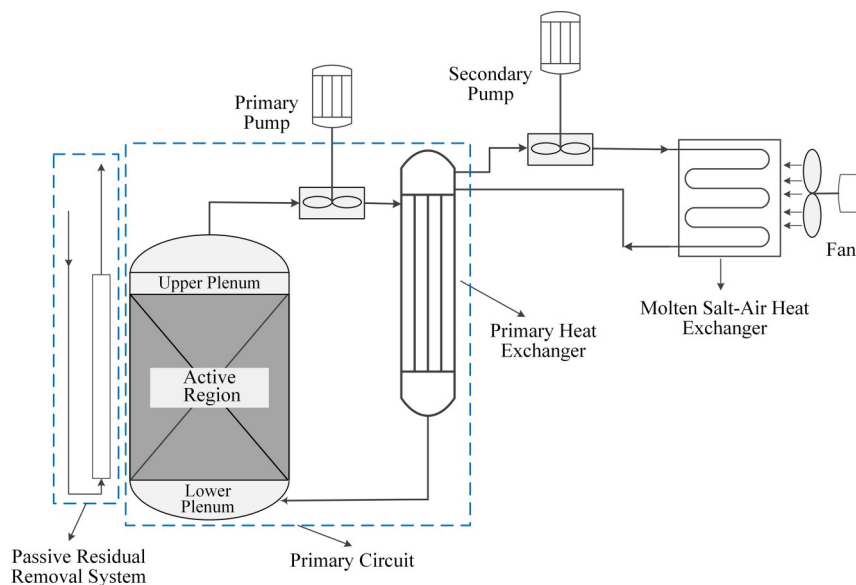


图1 熔盐堆总体布局示意图
Fig.1 Overall layout diagram of the molten salt reactor

表1 熔盐堆主要设计参数

Table 1 Main design parameters of the molten salt reactor

主要参数 Main parameters	设计值 Design value
功率 Thermal power / MWt	2
堆芯出口燃料盐温度 Fuel salt outlet temperature / °C	650
燃料盐流量 Fuel salt flow rate / kg·s ⁻¹	50
冷却盐入口/出口温度 Coolant salt temperature (inlet/outlet) / °C	560/580
冷却盐流量 Coolant salt flow rate / kg·s ⁻¹	42
结构材料 Structure material	Hastelloy-N
反应性温度系数 Temperature coefficient of reactivity / °C	≈-10×10 ⁻⁵
缓发中子份额 Delayed neutron fraction	0.006 42 (Static state) 0.005 19 (Flowing state)

2 分析方法

本文利用系统安全分析程序对熔盐堆系统进行建模,并采用单一变量法研究反应性引入量、反应性引入速度及空冷系统空气流量对正常降功率过程中核功率和堆芯温度的影响。

2.1 分析程序

本研究采用在RELAP5/MOD4.0程序^[11]的基础上进行二次开发的程序RELAP5-TMSR。RELAP5/MOD4.0是由Innovative System Software(ISS)开发的RELAP5系列中最新版的轻水堆瞬态分析程序,程序采用一维、瞬态、双流体、六方程水力学模型,广泛应用于轻水堆事故瞬态分析^[14-18]。RELAP5-TMSR程序在原程序的基础上增加了熔盐流体和熔盐堆相关的换热关系式等模型^[19-21],以满足熔盐堆瞬态分析的需求。

2.2 熔盐堆分析模型

熔盐堆系统节点划分如图2所示,包括4个系统:燃料盐系统(主回路系统)、冷却盐系统(二回路系统)、空气冷却系统和非能动余热排出系统。模型基本情况如下:

1) 燃料盐系统:包括堆本体(上下腔室、堆芯活性区等)、燃料盐循环泵、主换热器一次侧、连接管道。

2) 冷却盐系统:主换热器二次侧、冷却盐循环泵、熔盐-空气换热器(Air Heater Exchange, AHX)一次侧、连接管道。

3) 空冷回路系统:熔盐-空气换热器(AHX)空气侧、空气入口/出口(采用时间控制体)、连接管道。

4) 非能动余热排出系统:堆舱空气换热器、空气管道、空气进出口(采用时间控制体),且在功率运行工况下,非能动余热排出系统一直保持开启状态。

5) 中子动力学,采用点堆中子动力学,模拟过程中燃料盐泵转速不变。

6) 换热器采用圆管热构件模型模拟。

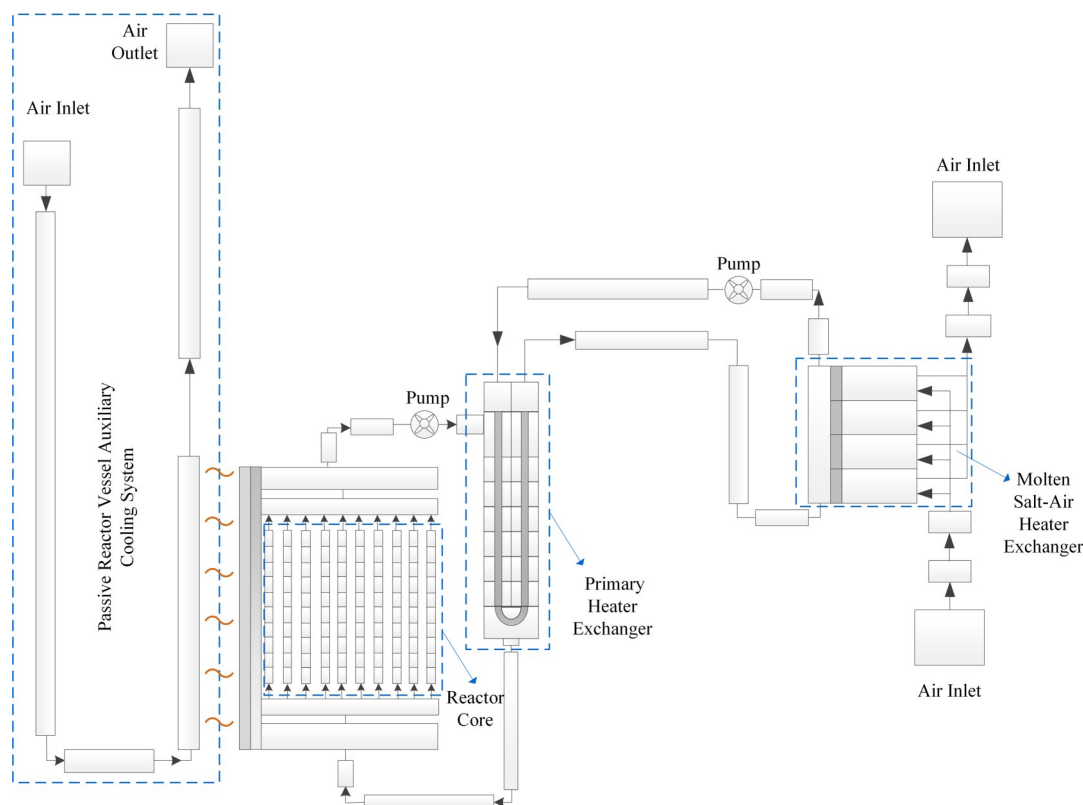


图2 熔盐堆系统节点示意图
Fig.2 Nodalization of the molten salt reactor

3 降功率过程中温度反馈系数影响分析

3.1 引入负反应性大小对功率波动影响

熔盐堆通过下插控制棒,引入负反应性来降低反应堆功率。当达到目标功率后,通过改变控制棒在堆芯的位置维持目标功率,并通过调节空冷系统空气流量匹配反应堆功率,最终稳定反应堆的温度和功率。在特殊情况下,若功率降低过大则可能导致堆芯温度快速下降,温度负反馈效应会导致功率再次升高,进而触发功率保护限值。本文对引入不同反应性(即下插不同深度控制棒)后功率波动情况进行模拟分析,研究温度负反馈效应对降功率过程的影响,引入的反应性分别为: -0.05% 、 -0.1% 、 -0.15% 、 -0.2% 、 -0.25% 、 -0.3% ,初始工况分为100% FP (Full Power)和80% FP两种工况,调节棒设计的积分价值小于1\$,功率运行时一般位于堆芯中间位置,因此 -0.05% ~ -0.3% 基本涵盖所有运行工况。整个过程中燃料盐回路、冷却盐回路和空冷系统的流量保持不变。

图3为引入不同负反应性后,堆芯反应性变化,图4为堆芯功率的变化(归一化后),图5为堆芯平均温度变化。本文考虑了控制棒的下插速度,即引入不同反应性的时间不同。为了便于比较,本节在模拟过程中,认为棒的下插速度不变,即反应性引入时间同引入反应性量的绝对值成正比。从图中可以看出,堆芯引入负反应性后,功率和堆芯温度先下降,随后在负反馈作用下经过几次波动后,最终又自动达到稳定状态。

初始工况为100% FP,引入 -0.15% 的反应性后,在负反馈的作用下,功率波动的峰值会达到120% FP的功率保护限值,触发保护动作。初始工况为80% FP时,初始功率距离保护限值较大,但当引入 -0.3% 的负反应性时,功率的波动仍超过120% FP的功率保护限值。因此熔盐堆降功率过程中,由于温度负反馈效应较大,会导致功率波动过大,进而触发不必要的保护动作。

为了便于比较降功率过程中功率和温度变化的情况,将功率和温度合并到图6(对应的初始工况为

100% FP, 引入反应性为 -0.25%)。从图中可以看出功率的下降速度较快, 温度下降相对滞后, 功率达到最低点后, 堆芯平均温度仍在下降, 在负反馈作用下会持续引入正反应性, 最终堆芯反应性大于零, 反应

堆处于超临界状态, 功率开始升高, 并超过 120% FP 的保护限值。高功率工况下功率变化幅度对引入反应性量非常敏感, 因此降功率过程中应少量多次引入反应性。

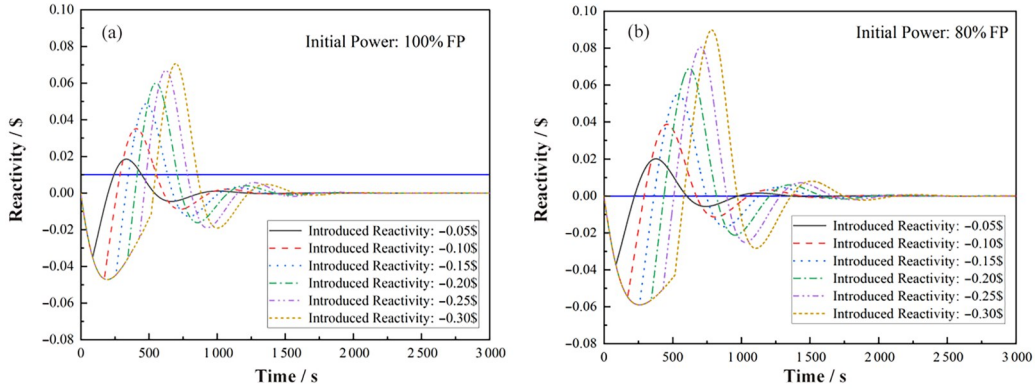


图3 引入不同的负反应性后, 堆芯反应性变化(彩图见网络版) (a) 初始功率 100% FP, (b) 初始功率 80% FP
Fig.3 Variations of reactivity after introducing different negative reactivity in the core (color online) (a) Initial power 100% FP, (b) Initial power 80% FP

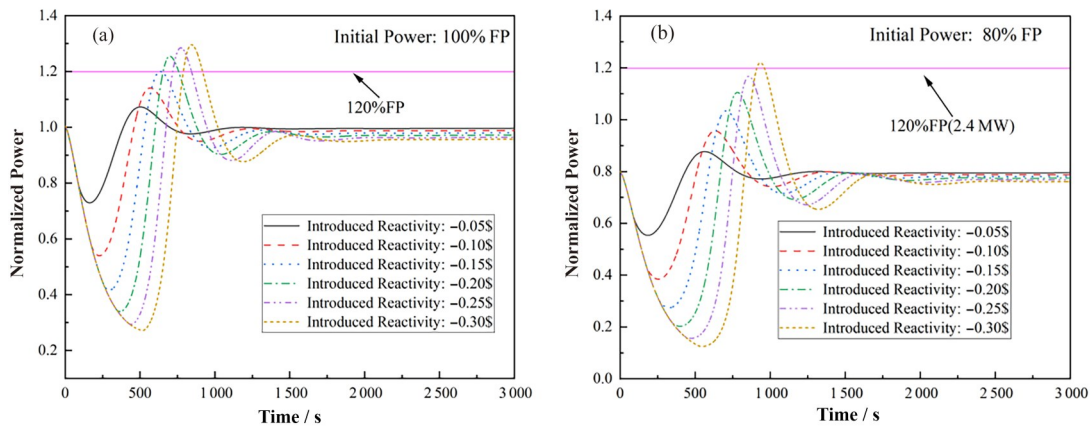


图4 引入不同的负反应性后, 归一化堆芯功率变化(彩图见网络版) (a) 初始功率 100% FP, (b) 初始功率 80% FP
Fig.4 Variations of normalized core power after introducing different negative reactivity (color online) (a) Initial power 100% FP, (b) Initial power 80% FP

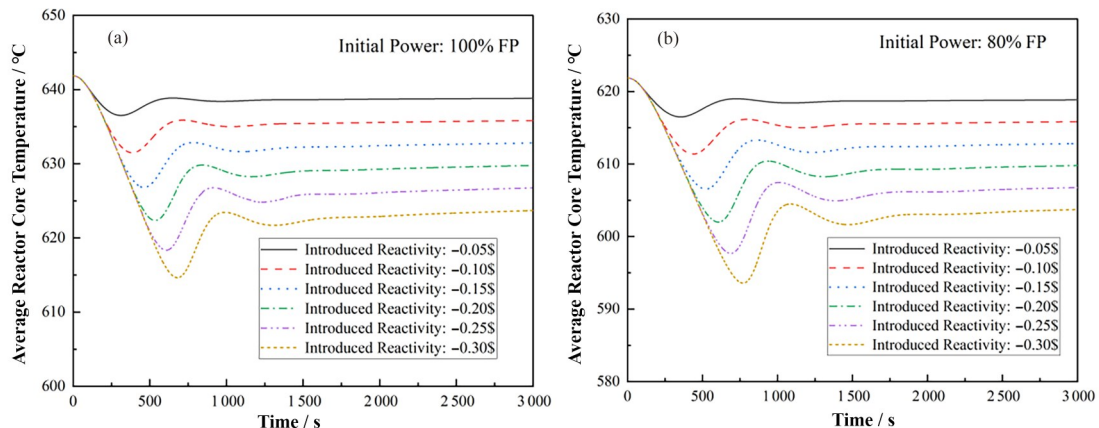


图5 引入不同的负反应性后, 堆芯平均温度变化(彩图见网络版) (a) 初始功率 100% FP, (b) 初始功率 80% FP
Fig.5 Variations of average reactor core temperature after introducing different negative reactivity (color online) (a) Initial power 100% FP, (b) Initial power 80% FP

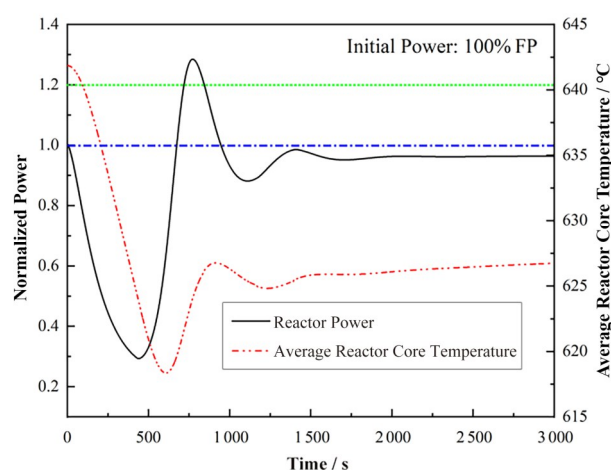


图6 引入负反应性后,归一化功率和堆芯平均温度的变化
Fig.6 Variations of normalized core power and the average reactor core temperature after introducing negative reactivity

3.2 反应性引入速率对功率波动影响

反应性引入速率对降功率过程中功率的波动有重要影响,本节通过模拟不同反应性引入速率,计算分析其对降功率过程功率波动的影响。模拟过程中选取熔盐堆的初始工况为100% FP,引入的总的负反应性为 -0.25% 。控制棒下插速度以设计最大下插速度 v_d 为基准,分别取 $100\%v_d$ 、 $90\%v_d$ 、 $80\%v_d$ 、 $70\%v_d$ 、 $60\%v_d$ 。

图7为不同负反应性引入速度下,堆芯反应性变化,图8为堆芯功率(归一化后)变化,图9为堆芯平均温度变化。从图中可以看出引入速度越慢,功率波动的峰值越小,当引入速度为 $80\%v_d$ 时,功率波动的最大峰值已低于120% FP的保护限值。同时,反应性引入速度越慢,堆芯功率和堆芯平均温度的波动幅度也相对变小。降功率过程中减缓控制棒下插速度有利于堆芯功率及温度的稳定。

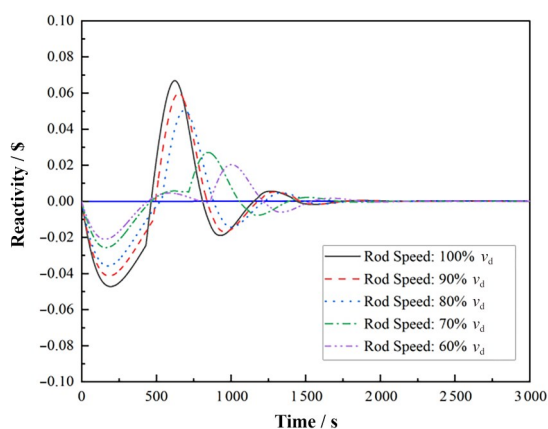


图7 不同反应性引入速度下,堆芯反应性变化(彩图见网络版)
Fig.7 Variations of reactivity with time at different reactivity insertion rates (color online)

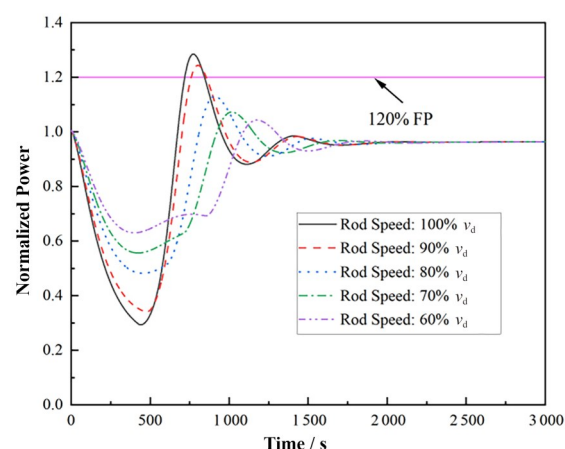


图8 不同反应性引入速度下,归一化堆芯功率变化(彩图见网络版)
Fig.8 Variations of normalized reactor core power with time at different reactivity insertion rates (color online)

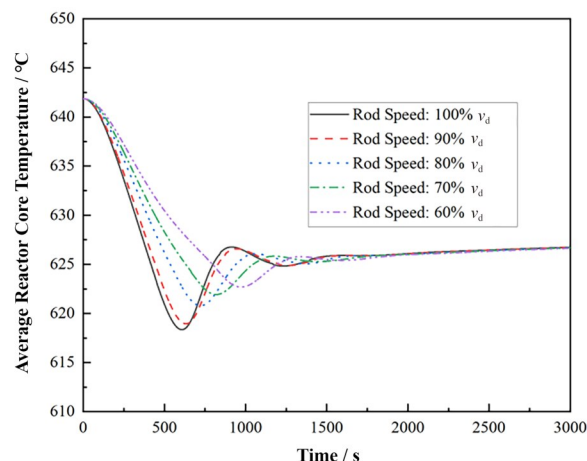


图9 不同反应性引入速度下,堆芯平均温度变化(彩图见网络版)
Fig.9 Variations of the average reactor core temperature with time at different reactivity insertion rates (color online)

3.3 空冷系统空气流量对功率波动影响

正常工况下,堆芯产生的核功率经燃料盐回路和冷却盐回路带走,并最终由空冷系统带至大气环境。空冷系统空气流量是影响正常排热能力的重要因素,因此空冷系统空气流量会影响堆芯温度,进而影响降功率过程中功率的波动。

本节通过在降功率过程中调节空冷系统空气流量,来分析其对空冷系统流量对降功率过程功率波动的影响。模拟过程中选取熔盐堆的初始工况为100% FP,引入的总的负反应性为 -0.25% 。空冷系统空气流量以设计流量为 m_d 基准,分别取 $100\%m_d$ 、 $90\%m_d$ 、 $80\%m_d$ 、 $70\%m_d$ 、 $60\%m_d$ 。

图10为不同空气流量下,堆芯反应性变化,图11为堆芯功率(归一化后)变化,图12为堆芯平均温

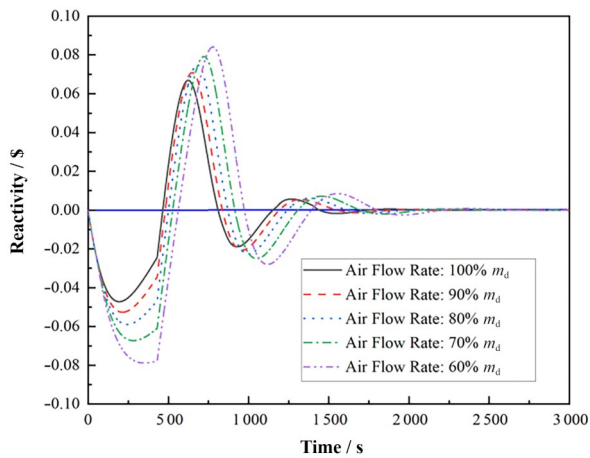


图10 不同空气流量下,堆芯反应性变化(彩图见网络版)
Fig.10 Variations of reactivity with time at different air mass flow rates (color online)

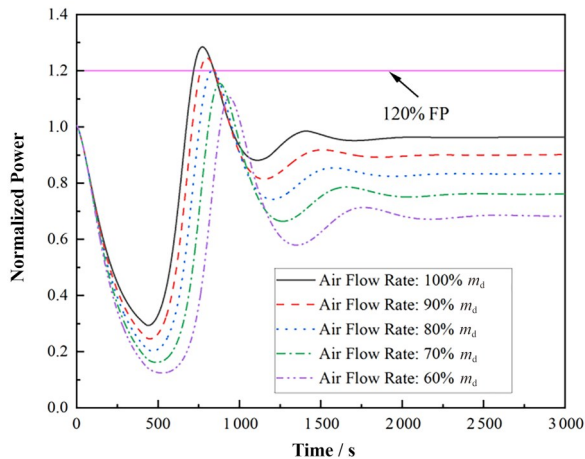


图11 不同空气流量下,归一化堆芯功率变化(彩图见网络版)
Fig.11 Variations of normalized reactor core power with time at different air mass flow rates (color online)

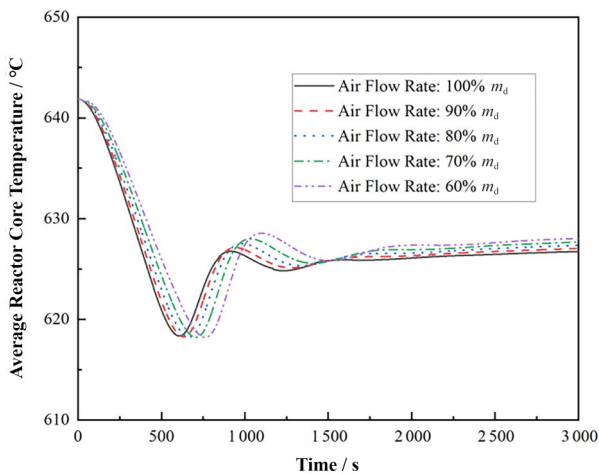


图12 不同空气流量下,堆芯平均温度变化(彩图见网络版)
Fig.12 Variation of the average reactor core temperature with time at different air mass flow rates (color online)

度变化。从图中可以看出,空冷系统空气流量越小,功率向上波动的峰值越低,功率波动越小,当空气流量为 $80\% m_d$ 时,功率波动的最大峰值已低于 120% FP的保护限值。从模拟图中还可以看出,不同空气流量下,堆芯核功率的波动范围和堆芯平均温度的波动幅度未见明显变化。

3.4 讨论

通过上述计算分析可知,由于熔盐堆具有较大的反应性温度系数,在降功率过程中若下插控制棒幅度过大,会因温度负反馈效应使得功率波动超过安全整定值,触发紧急停堆等保护动作。

通过控制棒引入负反应性后,堆芯功率降低,导致堆芯温度降低,在温度负反馈效应的作用下,堆芯引入正反应性。功率的下降和堆芯温度的下降并不完全同步,同时由于功率和正常排热系统带出的热量并不匹配,堆芯温度有一定的滞后效应,当功率达到最低值时,堆芯温度仍然下降并引入正反应性,最终,当负反馈效应引入的正反应性大于控制棒下插引入的负反应性时,堆芯功率升高。堆芯功率升高,引起堆芯温度升高,在温度负反馈效应的作用下,堆芯将引入负反应性,当温度升高到一定程度,堆芯反应性变为负值,因此功率再次降低,从而堆芯功率和温度呈现波动。负反馈效应会部分抵消最初引入的负反应性,但它无法完全抵消最初引入的全部负反应性,因此功率和温度的波动的幅度会逐渐降低,最终达到相对平衡状态,且最终稳定后功率以及温度较初始功率与温度低。

由于温度负反馈效应引入的反应性同温度变化幅度呈正比,因此当初始引入负反应性总量较大时,就需要更大的功率和温度变化,方可抵消初始反应性影响,故初始引入负反应性越大,功率和温度的波动幅度也就越大。

反应性引入速率是影响降功率过程的重要因素,反应性引入速率越慢,功率的下降速度越慢,堆芯温度下降引起的正反馈效应相对显著,因此堆芯功率下降得相对缓慢且最低功率相对较高。同时由于功率降低较少,因此堆芯温度下降相对较少,如图9所示。堆芯温度降低较少,导致温度负反馈效应引入的总的正反应性相对较小,故功率向上波动的峰值较低,更不易触发 120% FP的功率保护限值,如图8所示。此外,反应性引入速度越低,堆芯功率和堆芯温度的波动幅度越小,对反应堆的热冲击等越小。

空气流量对降功率过程也有较大影响,空气流量表征了正常排热系统带走热量的能力。空气流量越大,带走的热量越多,反之,带走的热量越少。因

此空气流量越小,堆芯温度下降得相对越少,因此由于温度负反馈效应引入的正反应性相对较少,故相同负反应性引入后,空气流量越小,功率能达到更低的值。更低的功率,还会导致温度继续下降,抵消了由于空气流量降低导致堆芯温度升高的效应,因此整体而言堆芯温度的最低值变化不大,如图12所示。

空气流量的变化不能降低功率和堆芯温度波动幅度范围,但在相同负反应性引入量的情况下,由于空气流量降低能使得功率最小值更低,因此有更多向上波动的而不触发120%FP保护限值的裕量,故降低空气流量可以减少触发保护动作的可能,如图11所示。相对而言,降功率过程中熔盐堆功率变化量对于反应性引入量和引入速度更为敏感,二者可以直接影响核功率的变化,空冷系统流量则通过影响温度变化间接影响功率变化,因此影响相对滞后。

正常降功率过程中,运行人员应充分认识温度负反馈效应的影响。满功率条件下,单次反应性引入量建议不超过0.15\$,同时可适当降低控制棒插入速度并配合空冷系统空气流量调节,以降低功率的波动。特殊情况下若需要大幅度降低功率,则操纵人员需特别关注由于温度负反馈效应引起的再临界,应根据堆芯功率的变化趋势,持续下插控制棒,以抵消温度负反馈引入的正反应性。防止发生非必要地超过保护限值,触发紧急停堆的情况。

4 结语

本文模拟分析了在熔盐堆降功率过程中不同反应性引入量、插棒速度和空气流量下堆芯功率的波动和变化趋势。分析结果显示,熔盐堆降功率过程中存在因温度负反馈效应而触发功率超过安全整定值的可能,100%FP时,单次反应性引入量超过0.15\$时会导致功率波动超过保护限值,触发紧急停堆;降低单次反应性的引入量和引入速度能够有效地抑制堆芯功率和温度的波动,防止功率超过保护限值,100%FP时,引入总量-0.25\$反应性时,将控制棒速度降低为最大下插速度的80%可防止功率波动超过保护限值;降低空气流量能够防止功率波动超过保护限值,但对抑制堆芯功率和温度波动效果不明显,100%FP时,当引入总量-0.25\$反应性时,空气流量降低为80%的额定流量时,功率波动最大峰值低于保护限值。熔盐堆正常降功率过程中,操纵人员应充分认识温度负反馈效应的影响,降低单次控制棒插入总量和控制棒插入速度,并合理地调节空冷系统空气流量,能够有效地控制堆芯功率和温度的波动,以防止不必要的触发保护系统限值。

作者贡献声明 王凯负责实施研究、采集数据及分析解释数据,起草文章及获取研究经费;陈贻炫、王超群、杨群、袁光鹏、韩钰、王子赞负责对文章的知识性内容作批评性审阅;何兆忠、赵秦财对文章的知识性内容作批评性审阅,并提供技术支持。

参考文献

- 1 李景善,史进,韩政. 反应堆温度系数的作用机理解析[J]. 科技资讯, 2014, 12(34): 81 - 82, 84. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2014.34.064.
LI Jingshan, SHI Jin, HAN Zheng. Mechanism analysis of the temperature coefficient of reactivity in nuclear reactors[J]. Science & Technology Information, 2014, 12 (34): 81 - 82, 84. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3791.2014.34.064.
- 2 Nguyen D H. The new equilibrium state of a perturbed nuclear reactor with negative feedback[J]. Nuclear Science and Engineering, 1973, 52(3): 292 - 298. DOI: 10.13182/nse73-a19476.
- 3 江绵恒,徐洪杰,戴志敏. 未来先进核裂变能: TMSR核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Advanced fission energy program-TMSR nuclear energy system[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 366 - 374. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2012.03.016.
- 4 徐洪杰,戴志敏,蔡翔舟,等. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. 现代物理知识, 2018, 30(4): 25 - 34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.
XU Hongjie, DAI Zhimin, CAI Xiangzhou, et al. Thorium-based molten salt reactor and comprehensive utilization of nuclear energy[J]. Modern Physics, 2018, 30 (4): 25 - 34. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.007.
- 5 蔡翔舟,戴志敏,徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, 45(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, 45(9): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
- 6 Wang K, Wang C Q, Yang Q, et al. Uncertainty and sensibility analysis of loss-of-forced-cooling accidents for 150-MWt molten salt reactors[J]. Nuclear Science and Techniques, 2025, 36(6): 111. DOI: 10.1007/s41365-025-01681-9.
- 7 余文,何龙,邹杨,等. 基于TREND程序的石墨通道液态熔盐堆无保护反应性引入事故初步分析[J]. 核动力工程, 2022, 43(1): 78 - 83. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.01.

0078.
YU Wen, HE Long, ZOU Yang, *et al.* Preliminary analysis of unprotected reactivity introduction accident of liquid molten salt reactor with graphite channel based on TREND program[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, **43**(1): 78 - 83. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.01.0078.
- 8 孙暖. 熔盐堆自稳定性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
SUN Nuan. Analysis on the self-stabilization for a Molten Salt Reactor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
 - 9 魏泉, 梅龙伟, 战志超, 等. 液态熔盐堆运行安全特性初步研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(12): 2280 - 2286. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.12.2280.
WEI Quan, MEI Longwei, ZHAN Zhichao, *et al.* Preliminary study on safety characteristics of molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(12): 2280 - 2286. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.12.2280.
 - 10 王超群, 王凯, 杨群, 等. 基于深度学习的熔盐堆多参数预测方法研究[J]. 核技术, 2025, **48**(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240421. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240421.
WANG Chaoqun, WANG Kai, YANG Qun, *et al.* Prediction of multi-parameters of molten salt reactor based on deep learning methods[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(9): 090601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240421. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240421.
 - 11 Jiao X W, Wang K, Wu Y H, *et al.* Application of multiple linear regression to trip setpoint analysis in areactivity-initiated accident of a molten salt reactor[J]. International Journal of Energy Research, 2021, **45**(8): 11629 - 11641. DOI: 10.1002/er.5418.
 - 12 王凯, 焦小伟, 杨群, 等. 紧急停堆棒落棒时间对熔盐堆反应性引入瞬态的影响[J]. 核技术, 2020, **43**(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.
WANG Kai, JIAO Xiaowei, YANG Qun, *et al.* The effect of scram rod drop time on the consequences of molten salt reactor reactivity insertion transient[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.
 - 13 Zhou B, Yu X H, Zou Y, *et al.* Study on dynamic characteristics of fission products in 2 MW molten salt reactor[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(2): 17. DOI: 10.1007/s41365-020-0730-z.
 - 14 Perez M, Reventos F, Batet L, *et al.* Uncertainty and sensitivity analysis of a LBLOCA in a PWR Nuclear Power Plant: Results of the Phase V of the BEMUSE programme[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, **241**(10): 4206 - 4222. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2011.08.019.
 - 15 Lee C H, Huang I M, Chang C J, *et al.* Using an IIST SBLOCA experiment to assess RELAP5/MOD3.2[J]. Nuclear Technology, 1999, **126**(1): 48 - 61. DOI: 10.13182/NT99-A2957.
 - 16 Kinoshita I, Nagumo H, Yamada M, *et al.* Quantification of the RELAP5 model uncertainty for application to the loss-of-RHR event during the mid-loop operation[C]//17th International Conference on Nuclear Engineering. July 12 - 16, 2009, Brussels, Belgium. 2010: 611 - 621. DOI: 10.1115/ICONE17-75550.
 - 17 Minoru Y, Hiroichi N, Ikuo K. Quantification of the RELAP5 model uncertainty for application to the gravity injection event[C]//Proceedings of Annual/Fall Meetings of Atomic Energy Society of Japan. 2010: 371. DOI: 10.11561/aesj.2010f.0.371.0.
 - 18 Chung B D, Lee Y J, Park C E, *et al.* Improvements to the RELAP5/MOD3 reflood model and uncertainty quantification of reflood peak clad temperature: NUREG/IA-0132[R]. Korea Atomic Energy Research Institute, Korea Institute of Nuclear Safety, 1996.
 - 19 陈玉爽. 高温熔盐及熔盐换热器传热特性的实验和模拟研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2021.
CHEN Yushuang. Experimental and simulation study on heat transfer characteristics of high temperature molten salt and molten salt heat exchanger[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
 - 20 Jia W Y, Li R, Zuo X D, *et al.* Experimental validation of modeling and simulation capabilities of RELAP5-TMSR with the NNCL experimental facility[J]. Nuclear Technology, 2026, **212**(6): 1553 - 1566. DOI: 10.1080/00295450.2025.2496598.
 - 21 Li R, Cheng M S, Dai Z M. Improvement of the delayed neutron precursor transport model in RELAP5 for liquid-fueled molten salt reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, **394**: 111817. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2022.111817.