

颗粒床反应堆燃料组件瞬态特性研究

毛晨瑞, 吉宇, 孙俊, 郎明刚, 石磊

(清华大学核能与新能源技术研究院先进反应堆工程与安全教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要:核热推进系统不仅要像传统动力堆产生预期功率, 还需具备快速启动与推力调节的能力, 以满足其变轨与机动的需求。因此, 瞬态分析对于核热推进系统的方案设计、运行策略和集成试验等有重要作用。以颗粒床反应堆燃料组件为研究对象, 建立了一维瞬态热工水力模型, 并分析了功率提升过程以及反应性引入后的响应特性。研究发现由于颗粒床反应堆热量载出能力强, 且燃料颗粒自身热容小, 因此在启动等瞬态过程中换热滞后现象较弱, 从而避免了堆芯内由于蓄热效应显著可能造成的超温或热应力过大等现象, 有利于实现快速启动。额定工况下引入阶跃反应性, 冷却剂载热滞后于堆芯释热约 0.1 s, 同样有利于系统功率和推力的快速调节。此外, 颗粒床反应堆堆芯阻力会随着功率升高而增大, 因此在启动和推力调节等过程中需要进一步研究反应性引入与推进剂供应量的匹配技术, 以实现核热推进系统的运行与控制。

关键词:颗粒床反应堆; 核热推进系统; 燃料组件; 瞬态模型; 快速启动

中图分类号: V439.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)04-0076-07

Investigation on transient characteristics of fuel assembly in particle bed reactor core

MAO Chenrui, JI Yu, SUN Jun, LANG Minggang, SHI Lei

(Key Laboratory of Advanced Reactor Engineering and Safety of Ministry of Education,
Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To achieve orbit transfer and maneuver, the nuclear thermal propulsion (NTP) system should not only release the expected heat like the traditional power reactor but also have the capability of rapid start and thrust regulation. Therefore, transient analysis is important for system design, operation strategy, and integrated test of NTP. In this paper, a one-dimensional transient thermal hydraulics model of the Particle Bed Reactor (PBR) fuel assembly was established and the response performance was analyzed under a condition of power raising. It was observed that during the start-up procedure, the delay between heat transfer on the particle surface and heat release in the fuel kernel was minimal due to the strong heat removal by the coolant and the low heat capacity of the fuel particle. The effect prevented the

收稿日期: 2023-10-07 修回日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52106256)

作者简介: 毛晨瑞(1997—), 男, 博士, 研究领域为核热推进系统。

通信作者: 吉宇(1994—), 男, 博士, 助理研究员, 研究领域为新型核动力技术。

引用格式: 毛晨瑞, 吉宇, 孙俊, 等. 颗粒床反应堆燃料组件瞬态特性研究[J]. 火箭推进, 2024, 50(4): 76-82.

MAO C R, JI Y, SUN J, et al. Investigation on transient characteristics of fuel assembly in particle bed reactor core[J].
Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(4): 76-82.

over temperature and high thermal stress resulted from thermal storage, which benefits the rapid start. Under rated operating conditions, introducing a reactivity step change results in a thermal response that delays behind the variation in neutron density by about 0.1 s, which also benefits the system power and thrust rapid adjustment. Furthermore, the PBR core resistance rapidly increases with the elevation of core power. Therefore, further research is needed to optimize the matching of reactivity insertion and propellant supply during startup and thrust regulation processes. This study can inform the operation and control strategies of nuclear thermal propulsion systems.

Keywords: particle bed reactor; nuclear thermal propulsion; fuel assembly; transient model; rapid start

0 引言

核热推进技术是利用核裂变能直接加热推进剂(一般为氢气)并经由喷管膨胀喷出而产生推力的一种推进方式,其具有比冲高、推力大、工作时间和环境依赖性小等优点,在深空探测和国防安全等领域具有巨大的应用潜力^[1]。核热推进系统由核反应堆、涡轮泵、喷管、推进剂贮箱、屏蔽体、控制系统和推力传递结构等组成,其中核反应堆是决定核热推进系统性能的关键因素,历史上研究较为充分的反应堆主要包括美国 NERVA 型棱柱堆、苏联 RD-0410 反应堆以及美国颗粒床反应堆等,其中颗粒床反应堆可实现的堆芯功率密度最高且流阻最小。

颗粒床反应堆是美国布鲁克海文国家实验室(BNL)于 20 世纪 70 年代提出的概念,随后与 Grumman、Aerojet 和 B&W 等公司共同完成了设计^[2]。通过 Timberwind 和 SNTP 项目,颗粒床反应堆的可行性得到了初步验证,并取得了多项关键技术突破^[3]。近些年来,清华大学核研院充分发挥自身在高温气冷堆方面的积累,系统性地研究了基于颗粒床反应堆的核热推进技术,并结合未来趋势,提出了采用高丰度低富集度燃料(HALEU)的核热推进系统方案^[4]。此外,在颗粒床反应堆物理热工特性^[5-6]、核热推进系统性能分析^[7]等方面也开展了相关研究,但目前仍缺乏对于反应堆和核热推进系统的瞬态分析能力,难以高效地开展系统与运行控制方案设计迭代。

本文以颗粒床反应堆内关键组成单元——燃料组件为研究对象,建立了颗粒床燃料组件的一维瞬态热工水力模型,为后续全系统瞬态分析工作提供了关键模型的储备,同时为总体方案设计、启动与运行分析以及地面集成试验等提供参考。

1 燃料组件简化模型

核热推进系统中反应堆的瞬态特性对于系统的整体设计有重要的影响。颗粒床反应堆堆芯本体一般由燃料组件、反射层、控制部件和压力容器等组成。燃料组件是区别于其他堆芯概念的关键,其活性区是利用具有阻滞放射性、耐腐蚀和耐高温等特性的 TRISO 包覆颗粒燃料堆积而形成的环状颗粒床。TRISO 燃料颗粒直径为 400 ~ 700 μm ,核芯为 UC_2 或 $(\text{U}, \text{Zr})\text{C}$ 固溶体,外有 3 层包覆层,依次为疏松热解炭、致密热解炭和 ZrC 包覆层^[3],试验测试在 3 000 K 运行温度下可保持完整性^[8]。颗粒床内外两侧分别是冷孔管和热孔管,为燃料颗粒提供约束,并实现流量分配。冷孔管的外侧依次是冷却剂入口环形腔室和六棱柱慢化剂基体,热孔管内侧为热气汇集通道,如图 1 所示。冷却剂在燃料组件内首先流经慢化剂内的冷却通道,带走沉积的热量;然后进入入口环腔,依次径向流过冷孔管、颗粒床和热孔管,随后在热通道内汇集,并轴向流出燃料组件。

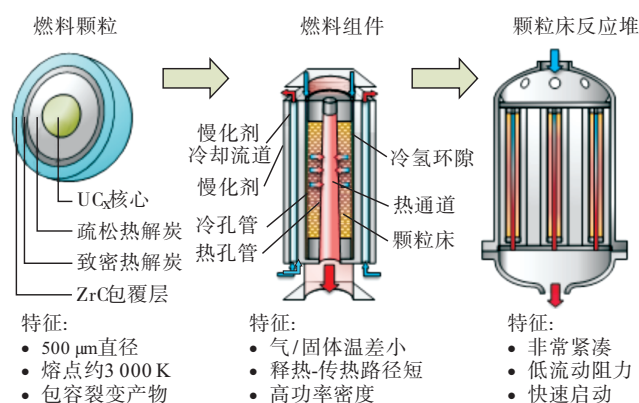


图 1 颗粒床反应堆概念示意图

Fig. 1 Schematic view of the particle bed reactor

颗粒床反应堆燃料组件为闭式流道,对单独组件的分析可以反映堆芯内的一些关键热工水力特性。通常情况下,燃料组件周向参数分布的差异性要远小于径向和轴向^[9],因此在初步分析中可将其简化成二维的模型,如图 2 (b) 所示。进一步地,当燃料组件内冷氢环隙和热氢通道间存在明显压差时,冷却剂进入颗粒床后流量再分配效应较弱。因此可将二维模型简化为一维模型,在保留主要热工水力规律的同时,提高瞬态分析的效率,如图 2 (c) 所示。将燃料组件分为入口段、颗粒床段以及出口段这 3 个控制体^[10]。

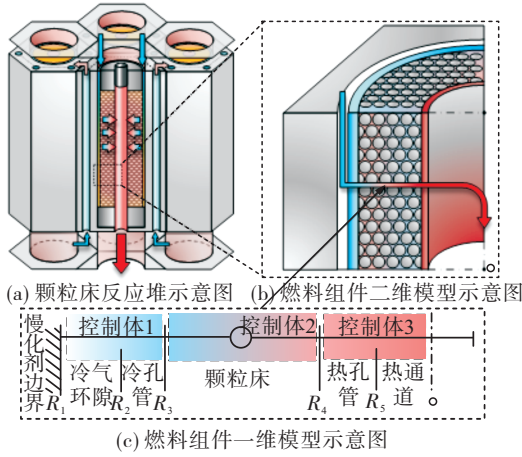


图 2 颗粒床反应堆燃料组件简化过程示意图

Fig. 2 Simplified process of the particle bed reactor fuel assembly

2 燃料颗粒传热模型

燃料颗粒内部传热和燃料颗粒与冷却剂的换热是颗粒床段控制体内的关键过程,在对流换热占优的情况下,忽略燃料颗粒间的接触导热和辐射换热,建立代表颗粒的瞬态传热集总参数模型,实现颗粒床段冷却剂和燃料颗粒平均温度的计算。

描述颗粒传热过程的方程为

$$\rho(1 - \alpha)V_{cv}\bar{c}\frac{dT}{dt} = q - hA_vV_{cv}(T_1 - T_G) \quad (1)$$

式中: ρ 为燃料颗粒密度, kg/m^3 ; α 为颗粒床体积孔隙率; V_{cv} 为控制体体积, m^3 ; \bar{c} 为燃料颗粒平均热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; q 为热源项, W ; h 为燃料颗粒表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_v 为控制体内颗粒床的比表换热面积, m^{-1} ; T_1 为颗粒表面温度, K ; T_G 为

冷却剂平均温度, K ; \bar{T} 为对 TRISO 颗粒核芯和各包覆层的温度进行热容加权平均后的燃料颗粒平均温度,即

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^4 [\rho_i V_i c_i (\frac{T_{i+1} + T_i}{2})]}{\rho(1 - \alpha)V_{cv}\bar{c}} \quad (2)$$

引入总传热系数 \bar{U} ^[11] 以描述颗粒表面温度、颗粒平均温度与冷却剂平均温度之间的关系,如图 3 所示,依据能量守恒原理,经燃料颗粒表面导出的热量与冷却剂载出的热量相等,即

$$h(T_1 - T_G) = \bar{U}(\bar{T} - T_G) = U_T(T_5 - T_1) \quad (3)$$

式中 U_T 为描述燃料颗粒内导热过程的等效换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在准稳态假设条件下,其计算公式为

$$U_T = (\sum_{i=1}^4 U_i^{-1})^{-1} \quad (4)$$

式中 U_4 、 U_3 、 U_2 和 U_1 分别为描述燃料核芯、疏松热解炭、致密热解炭和 ZrC 包覆层内导热过程的等效传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

$$U_{i=1,2,3} = \left(\frac{r_i r_{i+1}}{r_i - r_{i+1}} \right) \frac{k_{i+1}}{r_i^2} \quad (5)$$

$$U_4 = \frac{2r_4 k_4}{r_1^2} \quad (6)$$

式中: k_i 为各材料热阻, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; r_i 为各材料半径, m 。

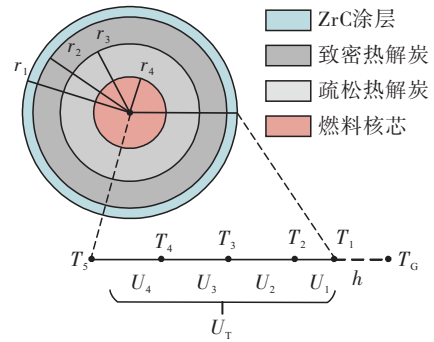


图 3 燃料颗粒模型示意图

Fig. 3 Schematic view of the fuel particle model

同时,定义系数 \bar{f} 表达式为

$$\bar{f} = \frac{\bar{T} - T_1}{T_5 - T_1} \quad (7)$$

根据各个换热环节能量守恒可以获得 \bar{f} 表达式为

$$\bar{f} = \frac{1}{2\rho(1-\alpha)V_{CV}\bar{c}}[\rho_4 V_4 c_4 (f_4 + f_3) + \rho_3 V_3 c_3 (f_3 + f_2) + \rho_2 V_2 c_2 (f_2 + f_1) + \rho_1 V_1 c_1 (f_1)] \quad (8)$$

其中

$$f_1 = \frac{U_T}{U_1} \quad (9)$$

$$f_2 = \frac{U_T}{U_2} + f_1 \quad (10)$$

$$f_3 = \frac{U_T}{U_3} + f_2 \quad (11)$$

$$f_4 = \frac{U_T}{U_4} + f_3 = 1 \quad (12)$$

将式(8)代入式(3)即可获得总传热系数 \bar{U} 表达式为

$$\bar{U} = \frac{hU_T}{\bar{f}h + U_T} \quad (13)$$

3 组件瞬态分析流程

在核热推进系统中反应堆堆芯入口压力和温度边界由推进剂供应系统决定,出口处则由喷管提供压力边界约束,因此选取入口温度 T_{in} 、压力 p_{in} 以及出口压力 p_{out} 和燃料颗粒的体积释热率 q''' 为组件瞬态分析的边界参数。建立一维颗粒床控制体内的能量和动量方程分别为

$$\frac{dh}{dt} = \frac{G(h_{in} - h_{out})}{m} + \frac{Q_1}{m} \quad (14)$$

$$\frac{dG}{dt} = \frac{A_{CV}}{L_{CV}}(p_{in} - p_{out} - RG^2) \quad (15)$$

式中: h 为流体比焓, J/kg; G 为质量流量, kg/s; Q_1 为燃料颗粒与流体的换热功率, W; m 为控制体内流体质量, kg; p 为流体压力, Pa; A_{CV} 为控制体通流面积, m^2 ; L_{CV} 为控制体长度, m; R 为控制体总阻力系数, $Pa/(kg \cdot s^{-1})^2$; 下标 in 和 out 分别表示控制体进口与出口参数。

控制体阻力系数 R 中的颗粒床压降系数 R_{pb} 采用 Ergun 关系式^[12] 计算,即

$$R_{pb} = L \left[\frac{150\mu v(1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho v^2(1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \right] / G^2 \quad (16)$$

式中: L 为颗粒床厚度, m; D_p 为燃料颗粒直径, m; μ 为动力学黏度, $kg/(m \cdot s)$; v 为颗粒表面速度, m/s; ε 为颗粒床孔隙率。

总换热系数 \bar{U} 中的颗粒床对流换热系数 h 采用式(1)来确定,即

$$Nu = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \left[0.622 \, 926 \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{2.32} + 6.446 \, 03 \times 10^{-4} \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^3 \right]^{0.25} Pr^{0.33} \quad (17)$$

其中

$$Re = \frac{D_p G}{\mu A_f} \quad (18)$$

式中 A_f 为颗粒床区域平均通流面积, m^2 。

基于以上推导建立的颗粒床反应堆燃料组件瞬态分析流程如图 4 所示。首先,根据组件几何参数计算等效一维控制体几何参数,以及燃料颗粒集总模型参数。其次,根据初始边界条件确定初始稳态计算结果作为瞬态分析的基础。最后,每个时间步内根据推进剂流动顺序依次更新各个控制体参数并输出各时间步的计算结果。

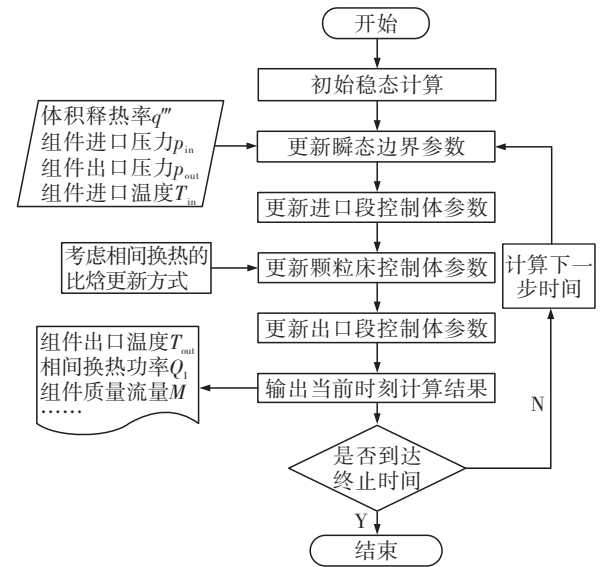


图 4 一维燃料组件瞬态热工水力分析流程图

Fig. 4 Flow chart of transient thermal-hydraulic analysis of one-dimensional fuel assembly

4 结果与讨论

4.1 模拟功率提升瞬态响应

依据上述模型和求解流程,编制了颗粒床反应堆燃料组件的一维瞬态计算程序,并对 110 kN 的核热推进系统的反应堆燃料组件瞬态特性进行了分析。表 1 和表 2 分别为该燃料组件和燃料颗粒的设

计参数。系统在额定点运行时,燃料组件进口温度为 260 K、进出口压力分别为 7.5 MPa 和 6 MPa。

表 1 颗粒床燃料组件主要几何设计参数

Tab.1 Geometry and thermal parameters of the particle bed fuel assembly

| 燃料组件几何参数 | 数值 |
|------------|-------|
| 冷气环隙外半径/mm | 32.20 |
| 冷孔管外径/mm | 30.20 |
| 冷孔管厚度/mm | 3.00 |
| 冷孔管孔隙尺寸/mm | 0.12 |
| 冷孔板孔隙率 | 0.20 |
| 颗粒床厚度/mm | 5.20 |
| 燃料颗粒直径/mm | 0.50 |
| 颗粒床孔隙率 | 0.38 |
| 热孔管厚度/mm | 2.00 |
| 热孔板孔隙率 | 0.50 |
| 冷气环歧管系数 | 0.95 |
| 热气通道歧管系数 | 0.89 |
| 燃料组件总长度/cm | 63.59 |

表 2 燃料颗粒主要设计参数参数

Tab.2 Main parameters of the fuel particle

| 燃料颗粒结构 | 半径/mm | 密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 比热/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$] | 导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$] |
|----------------------|-------|--|---|--|
| UC ₂ 燃料核芯 | 0.220 | 12 000 | 200 | 17.50 |
| 疏松热解炭包覆层 | 0.230 | 1 100 | 3 000 | 2.75 |
| 致密热解炭包覆层 | 0.240 | 1 900 | 3 000 | 5.84 |
| ZrC 包覆层 | 0.250 | 6 730 | 200 | 20.50 |

为模拟颗粒床反应堆的快速启动过程,假设燃料颗粒功率密度变化曲线如图 5 所示,即在 30 s 内增加到 25.6 GW/m³。在该过程中,燃料组件内关键参数的变化情况如图 6 和图 7 所示。随着功率密度的提高,燃料颗粒平均温度和推进剂温度也迅速升高,且两者的温差也逐渐增大。这主要是 TRISO 颗粒的热容效应导致燃料颗粒表面换热功率滞后燃料核芯释热大约 0.2 ~ 0.5 s。随着堆芯功率稳定,表面换热功率迅速提升至与燃料核芯内释热功

率相同水平,从而在冷却剂、燃料表面和燃料核芯间形成稳定的温差。与其他类型反应堆相比,颗粒床反应堆的热容效应较小,从而能够较好地避免超温或热应力过大的问题,有利于核热推进系统的快速启动。此外,由于堆内温度迅速升高,导致推进剂黏性增大,从而燃料组件内的阻力系数也增大。因此在相同的压差下,燃料组件内的推进剂质量流量随功率升高而降低,极端情况下可能会进一步造成堆芯的冷却不足,这是气冷反应堆的重要特点之一。

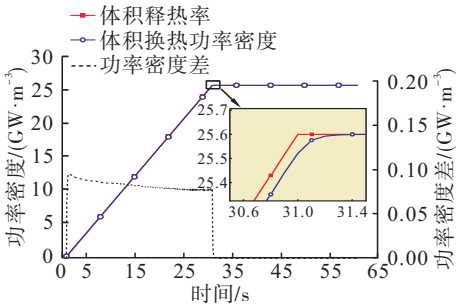


图 5 燃料颗粒内释热与颗粒床表面换热变化情况

Fig.5 Volumetric heat deposition and surface heat removal by coolant

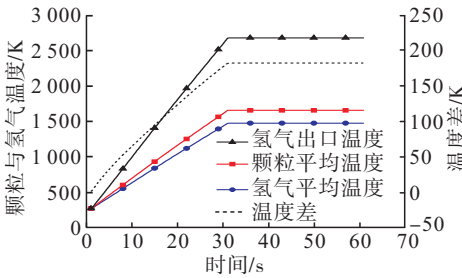


图 6 颗粒床内推进剂与颗粒平均温度变化情况

Fig.6 Mean temperature of the propellant and the fuel particle in the bed

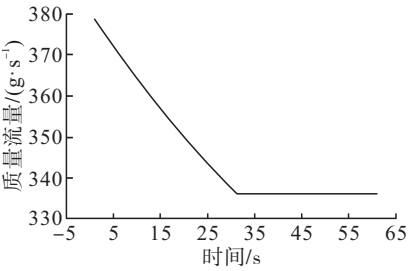


图 7 燃料组件质量流量变化情况

Fig.7 Mass flow rate in the fuel assembly

4.2 引入反应性阶跃后瞬态响应

为了研究反应堆物理瞬态特性对于额定工况下颗粒床燃料组件热工参数的影响引入了点堆中子动力学模型,与燃料组件热工水力模型进行外部耦合。

描述核反应堆状态的无量纲参数称为反应性 ρ ,其绝对值大小表示了偏离反应堆临界状态的程度^[13]。 $\rho=0$ 表示反应堆处于临界状态,即堆芯内中子数维持不变,反应堆功率保持在一个恒定的水平; $\rho>0$ 表示反应堆处于超临界状态,堆内中子数增加,堆芯功率提高。反应性 ρ 相对于反应堆参数的变化率称为该参数的反应性系数 α 。考虑燃料颗粒温度反馈的反应性计算关系式为

$$\rho(t) = \rho_0 + \alpha [T(t) - T_0] + \rho_{\text{extra}} \quad (19)$$

式中: $\rho(t)$ 为 t 时刻堆芯净反应性; α 为燃料颗粒温度系数,pcm/K,1 pcm = 10^{-5} ; T_0 为参考温度,K; ρ_0 为 T_0 温度下的净反应性; ρ_{extra} 为额外引入的反应性,如控制鼓转动引起的反应性。对于所研究的颗粒床反应堆,取 6 组缓发中子参数,如表 3 所示^[14],其中,缓发中子总份额 $\beta=0.007\ 49$,中子每代时间 $\Lambda=33.5\ \mu\text{s}$ 。设置参考温度 T_0 为额定工况下颗粒平均温度,即1 653 K;考虑燃料膨胀效应、多普勒效应等的温度系数为 $-5\ \text{pcm/K}$ 。规定反应性等于缓发中子总份额($\rho=\beta$)时的反应性 ρ 为 1 \$。在达到额定工况后第 20 s 时分别引入 0.2 \$ 与 $-0.5\ \$$ 的阶跃反应性,以研究燃料组件功率变化过程特性。

表 3 缓发中子参数^[14]

Tab.3 Parameters of delayed neutron^[14]

| 第 i 组缓发中子份额 β_i | 第 i 组衰变常数 λ_i/s^{-1} |
|-------------------------|---------------------------------------|
| 0.000 28 | 0.013 23 |
| 0.001 59 | 0.039 00 |
| 0.001 41 | 0.139 00 |
| 0.003 05 | 0.359 00 |
| 0.000 96 | 1.410 00 |
| 0.000 20 | 4.030 00 |

在考虑燃料温度反馈的基础上引入反应性阶跃后的响应如图 8 和图 9 所示。引入反应性前,由于燃料组件处于额定工况临界状态,因此净反应性为 0,同时组件出入口和内部平均参数均为设计值。引入阶跃反应性后,燃料颗粒释热率随着中子数密度快速变化。由于颗粒表面换热功率变化稍滞后

于燃料核芯释热,两者的功率差导致颗粒平均温度变化,从而通过温度效应补偿了所引入的反应性,使燃料组件各参数在 0.1 s 后接近稳定,此效应可以增强颗粒床反应堆在快速变化过程中的稳定性。

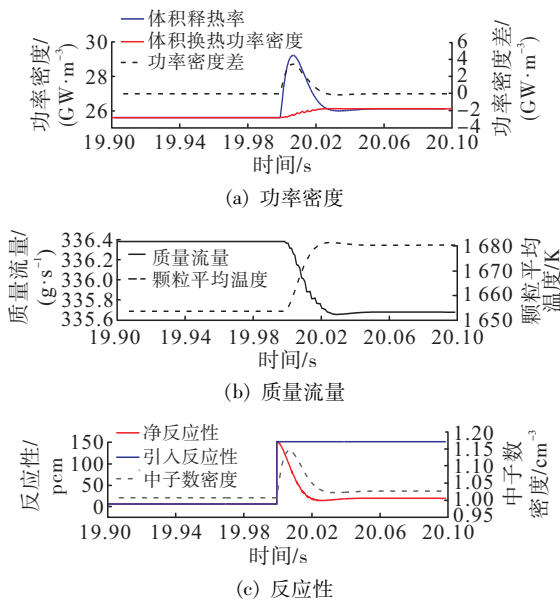


图 8 额定工况下引入 0.2 \$ 反应性各参数响应

Fig.8 The response of various parameters to the insertion of 0.2 \$ reactivity under rated conditions

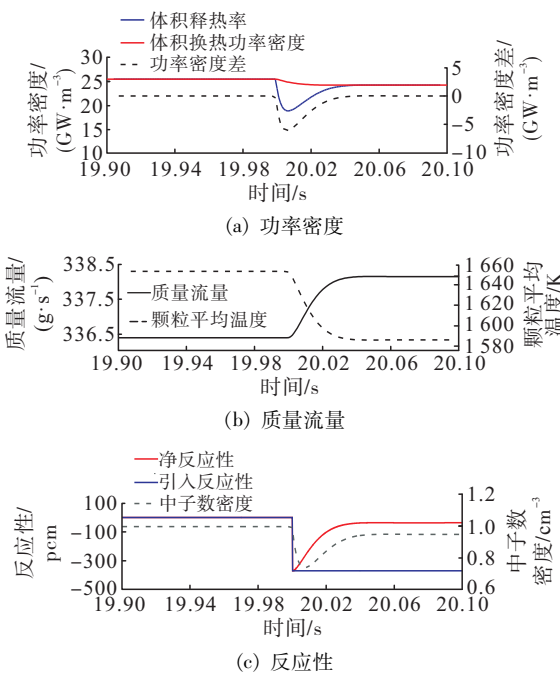


图 9 额定工况下引入 $-0.5\ \$$ 反应性各参数响应

Fig.9 The response of various parameters to the insertion of $-0.5\ \$$ reactivity under rated conditions

5 总结与展望

本文建立了颗粒床反应堆燃料组件的一维瞬态热工水力模型,对其在功率提升以及额定工况下反应性引入的瞬态特性进行了分析。在功率提升过程中,燃料组件颗粒床区域中存在极短的换热峰值滞后释热峰值现象,约为 0.2~0.5 s,有利于堆芯的快速启动。而随着堆芯功率升高,堆芯流动阻力系数增大,冷却剂流量会迅速减小,因此需要提高堆芯入口的压力,使堆芯功率与推进剂供应量协调。额定工况后引入阶跃反应性后,反应堆功率和燃料温度迅速变化,在负反馈调节下约 0.1 s 后,反应堆堆芯可以达到新的稳定状态,这一效应为核热推进系统的快速调节提供了可能。

该研究为颗粒床反应堆堆芯提供了初步的瞬态热工水力模型。后续还需进一步建立完整的核热推进系统瞬态模型,开展瞬态分析工作,为系统方案设计、运行策略和地面集成试验等工作提供基础。

参考文献

- [1] 苏著亭,杨继材,柯国土. 空间核动力[M]. 上海:上海交通大学出版社,2016.
SU Z T, YANG J C, KE G T, et al. Space nuclear power [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2016.
- [2] 解家春,霍红磊,苏著亭,等. 核热推进技术发展综述[J]. 深空探测学报,2017,4(5):417-429.
XIE J C, HUO H L, SU Z T, et al. Review of nuclear thermal propulsion technology development [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(5): 417-429.
- [3] HASLETT R A. Space nuclear thermal propulsion program; PL-TR-95-1064 [R]. [S.l.]: Grumman Aerospace Corporation, 1995.
- [4] 吉宇. 基于颗粒床反应堆的核热推进系统设计关键技术研究[D]. 北京:清华大学,2020.
JI Y. Research on the theory and key technologies in the design of a particle bed reactor based nuclear thermal propulsion system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [5] JI Y, ZHANG H, SUN J, et al. Thermal performance optimization of a fuel element in particle bed reactors for nuclear thermal propulsion [J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 355: 110316.
- [6] 吉宇,毛晨瑞,孙俊,等. 氢气在颗粒床内流动不稳定性分析[J]. 工程热物理学报,2024,45(4):1156-1161.
JI Y, MAO C R, SUN J, et al. Instability analysis of hydrogen flow in granular bed [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, 45(4): 1156-1161.
- [7] 毛晨瑞,吉宇,孙俊,等. 核热推进系统分析程序模型与计算方法初步研究[J]. 原子能科学技术,2024,58(3):680-688.
MAO C R, JI Y, SUN J, et al. Preliminary research on model and computational method of system analysis program in nuclear thermal propulsion [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(3): 680-688.
- [8] LUDEWIG H, POWELL J R, TODOSOW M, et al. Design of particle bed reactors for the space nuclear thermal propulsion program [J]. Progress in Nuclear Energy, 1996, 30(1): 1-65.
- [9] JI Y, LI Z G, SUN J, et al. Numerical investigation and parametric study on thermal-hydraulic characteristics of particle bed reactors for nuclear thermal propulsion [J]. Nuclear Technology, 2020, 206(8): 1155-1170.
- [10] CASEY W E. Thermal-hydraulic transient analysis of a packed article bed reactor fuel element [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [11] MEYER J E. Some physical and numerical considerations for the SSC-S code [M]. New York: Brookhaven National Laboratory, 1978.
- [12] HASSAN Y A, KANG C. Pressure drop in a pebble bed reactor under high Reynolds number [J]. Nuclear Technology, 2012, 180(2): 159-173.
- [13] 谢仲生,吴宏春,张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 修订本. 西安:西安交通大学出版社,2004.
- [14] WITTER J K. Modeling for the simulation and control of nuclear reactor rocket systems [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1993.