

多孔弥散微封装燃料元件多场耦合性能分析

李晨曦, 李权, 黄永忠, 赵波, 王浩煜, 刘仕超, 李垣明, 陈平
(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610213)

摘要: 高温气冷堆是核热推进的主力候选堆型之一, 燃料元件的性能直接决定了反应堆的性能, 高温气冷堆的燃料元件形式众多, 高安全性的弥散微封装燃料在高温气冷堆中具有极高的应用前景。因此, 有必要针对高温气冷堆用弥散微封装燃料开展研究。提出将 TRISO 燃料颗粒弥散于 SiC 基体的多孔弥散微封装燃料的设计方案, 并基于有限元分析软件 COMSOL 建立了三维热流固耦合分析模型, 初步实现了该燃料元件性能分析, 开展了不同冷却剂流量下的燃料元件热力行为分析。结果表明: 流量越高, 燃料元件最高温度越低, 分别为 1 340、1 250、1 180 K, 远低于 SiC 材料熔点, 无熔化风险; 六棱柱内部的温度分布相对均匀, 而六棱柱 6 个角处的温度分布相对不均匀; 基体最大主应力出现在冷却剂流道周围, 最大主应力最大值为 95.6 MPa, 其余位置整体最大主应力较小, 最大主应力低于 SiC 材料断裂强度。

关键词: 棱柱型; 多孔弥散微封装燃料; 多场耦合

中图分类号: TL35

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)04-0110-07

Analysis for multi-physics coupling performance of prismatic dispersed microencapsulated fuel

LI Chenxi, LI Quan, HUANG Yongzhong, ZHAO Bo, WANG Haoyu,
LIU Shichao, LI Yuanming, CHEN Ping
(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: High-temperature gas-cooled reactors are one of the main candidate reactors for nuclear thermal propulsion. The performance of the reactor is mainly influenced by the performance of the fuel element. There are many forms of fuel elements in high-temperature gas-cooled reactors, and high safety dispersed microencapsulated fuels have extremely high application prospects in high-temperature gas-cooled reactors. Therefore, the analysis for microencapsulated fuels for high-temperature gas-cooled reactors is needed. A prismatic dispersed microencapsulated fuel with TRISO particles dispersed in SiC matrix was proposed in this paper. Based on the finite element analysis software COMSOL, a three-dimensional thermal-fluid-solid coupling analysis model was established to initially realize the performance

收稿日期: 2024-03-01 修回日期: 2024-07-28

基金项目: 中国科协青年人才托举工程; 核技术研发课题 (HNKF202316(48)); 四川省杰出青年科技人才项目 (2024NSFJQ0036)

作者简介: 李晨曦 (1994—), 博士, 工程师, 研究领域为燃料设计。

引用格式: 李晨曦, 李权, 黄永忠, 等. 多孔弥散微封装燃料元件多场耦合性能分析[J]. 火箭推进, 2024, 50(4): 110-116.

LI C X, LI Q, HUANG Y Z, et al. Analysis for multi-physics coupling performance of prismatic dispersed microencapsulated fuel[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(4): 110-116.

analysis of the fuel element and carry out experiments under different coolant flow flux. The results show that the higher the flow rate, the lower the maximum temperature of the fuel element, which is 1 340 K, 1 250 K and 1 180 K respectively. The temperature is far lower than the melting point of SiC material and there is no risk of melting; the temperature distribution inside the hexagonal prism is relatively uniform, while the temperature distribution at the six corners of the hexagonal prism is relatively uneven. The maximum principal stress of the matrix appears around the coolant flow channel, with a maximum value of 95.6 MPa. The overall maximum principal stress at other locations is smaller, and the maximum principal stress is lower than the fracture strength of the SiC material.

Keywords: prismatic; dispersed microencapsulated fuel; multi-physics coupling

0 引言

高温气冷堆是指采用气体作为反应堆冷却剂,将堆芯热量传导至二回路系统或直接推动气体透平发电机发电的核反应堆^[1]。由于氦氘气体的惰性特点、中子性能优异及可以实现高温运行,具有良好的安全性^[2],因此在核热推进等方面具有较高的前景。

自 20 世纪 80 年代起,美国提出了多种高温气冷堆概念设计方案,例如 S₄ 计划^[3]和普罗米修斯计划^[4]等。其中普罗米修斯计划具有内外双包壳的模块化燃料棒设计,堆叠陶瓷燃料芯块,内外包壳间的环形区域作为冷却剂通道,外包壳采用六边形设计便于组装构成堆芯,考虑了多种难熔合金和 SiC 作为包壳材料的可行性^[5]。S₄ 的堆芯为棱柱型,采用蜂窝煤状的 Mo-Re 合金多孔基体作为堆芯结构骨架,燃料孔道和冷却剂孔道按照一定的规律分布,将 UN 燃料芯块堆叠密封在燃料孔道中,采用氦氘混合气体(30% 氘)作为冷却剂^[6]。2019 年,美国能源部提出了“转型挑战反应堆(transformational challenge reactor, TCR)示范计划”^[7]。燃料元件采用了多层包覆的 TRISO 燃料颗粒,将 TRISO 燃料颗粒弥散在增材制造和密实化的 SiC 基体中^[8]。采用化学气相渗透将 TRISO 燃料颗粒和 SiC 粉末密实化构成燃料元件,燃料元件中部具有冷却孔道^[9]。基于不锈钢^[10]和 SiC^[11]分别提出了方案,由于采用 TRISO 燃料颗粒,TCR 燃料具有较高的安全性。目前,燃料元件已经入堆并完成了辐照后检查^[12]。相对而言,国内开展的研究工作较少。原子能院的李杨柳等^[13]针对棱柱型燃料的环形流道和圆管流道开发了单通道程序。杨谢等^[14]进行了棱柱式氦氘气冷堆的初步方案设计与中子物理分析,采用了 TRISO 包覆颗粒(UN 核芯)弥散在石墨基体中的棱柱型燃料方案。

国内外针对高温气冷堆提出了不同的方案,设计方案尚未定型,大多数方案的设计仍处于初步阶段。目前,陶瓷基弥散微封装燃料由于其高安全性,是极具潜力的燃料形式,但仅结构相似的 TRISO 燃料颗粒在高温气冷堆球形燃料元件中具有一定的工程应用经验^[15]。核动力院刘仕超等^[16]建立了辐照-热-力耦合作用下 TRISO 颗粒的多物理场计算方法,应用三维有限元平台对 TRISO 颗粒的堆内行为进行分析,但并未开展包含基体的燃料元件性能分析。此外,刘仕超等^[17]还针对中空六棱柱燃料开展了性能分析研究,主要针对基体的热力性能,未考虑流体的影响。

综上所述,本文基于 TRISO 包覆颗粒创新提出一种棱柱型多孔弥散微封装燃料设计方案,将 UO₂ 核芯的 TRISO 燃料颗粒弥散于 SiC 基体中。其中,TRISO 燃料颗粒自带裂变产物包容能力,球形结构承压能力更强,弥散形式可降低燃料中心温度,具有更好的安全性和可行性。SiC 材料的高温性能优异,并且具有良好的抗辐照性能。基于上述燃料设计,本文基于有限元软件建立了热流固耦合分析方法,对多孔弥散微封装燃料的热-流-固行为展开分析,研究了不同流量下基体的温度和应力分布状态,分析了多孔弥散微封装燃料在气冷堆中的应用可行性,为后续高温气冷堆的燃料元件设计提供参考。

1 材料参数

多孔弥散微封装燃料以 SiC 陶瓷为基体材料,TRISO 球为燃料,TRISO 球随机弥散分布于 SiC 基体中。因此本研究涉及的材料主要包括 SiC 陶瓷和 UO₂ 陶瓷球。

采用未经辐照、致密 UO₂ 的 Lucuta 修正模型^[18]计算其热导率,即

$$k_0 = \frac{1}{0.0375 + 2.165 \times 10^{-4} T} + \left(\frac{4.715 \times 10^9}{T^2} \right) \exp\left(-\frac{16361}{T}\right) \quad (1)$$

$$F_M = \frac{1 - P}{1 + (s - 1)P} \quad (2)$$

$$F_R = 1 - \frac{0.2}{1 + \exp[(T - 900)/80]} \quad (3)$$

式中: k_0 为未经辐照的、致密的 UO_2 的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; F_M 为孔隙度影响因子; P 为孔隙度, 一般取 5%; s 为形状因子, 球形形状因子为 0.5; F_R 为辐照效应影响因子; T 为温度, K 。

综合以上因素, UO_2 燃料核芯的热导率为

$$k_{\text{UO}_2} = k_0 F_M F_R \quad (4)$$

式中 k_{UO_2} 为考虑各种修正因子后的 UO_2 热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

UO_2 的热膨胀系数计算式为

$$\frac{\Delta L}{l} = K_1 T - K_2 + K_3 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (5)$$

式中: R 为玻尔兹曼常数; K_1 、 K_2 、 K_3 、 E_D 为常数, 本文分别取 1.0×10^{-5} 、 3.0×10^{-3} 、 4.0×10^{-2} 、 6.9×10^{-20} 。

UO_2 陶瓷球的理论密度为 $10.96 \text{ g}/\text{cm}^3$, 弹性模量为 220 GPa , UO_2 燃料核芯的泊松比为 0.316。

对于 TRISO 燃料颗粒的内外 PyC 层, 其热导率、热膨胀系数和泊松比分别为 $4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、 $5.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 和 0.23。PyC 层的弹性模量^[19]为

$$E_{\text{PyC}} = 25.5(0.384 + 0.000324\rho_{\text{PyC}}) \times (0.481 + 0.519B_{\text{AF}})(0.9560275 + 0.00015T) \quad (6)$$

式中: ρ_{PyC} 为密度, kg/m^3 ; B_{AF} 为各向异性因子, 本文取 1.2。

由于 SiC 层所占体积份额较小, 本文在考虑等效均匀化的基础上采用与 SiC 基体材料相同的材料物性模型, 其热导率、热膨胀系数及弹性模量^[20]分别为

$$k_{\text{SiC}} = 42.58 - \frac{1.5564 \times 10^4}{T_{\text{SiC}}} + \frac{1.2977 \times 10^7}{(T_{\text{SiC}})^2} - \frac{1.8458 \times 10^9}{(T_{\text{SiC}})^3} \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{SiC}} = 0.7738 + 7.080 \times 10^{-3} T - 4.951 \times 10^{-6} T^2 + 1.372 \times 10^{-9} T^3 \quad (8)$$

$$E_{\text{SiC}} = 460 \exp(-3.57P) - 0.04T \exp\left(-\frac{962}{T}\right) \quad (9)$$

式中: k_{SiC} 为 SiC 的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; α_{SiC} 为 SiC 的热膨胀系数, 10^{-6} K^{-1} ; E_{SiC} 为 SiC 的弹性模量, GPa 。

SiC 层的泊松比取常数 0.13。

对于疏松热解碳层 (Buffer 层), 其热导率和泊松比分别为 $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、0.23。计算中不考虑 Buffer 层的热膨胀。

疏松热解碳层的各向同性弹性模量^[20]为

$$E_{\text{Buffer}} = 11.06(0.9560275 + 0.00015T) \quad (10)$$

式中 E_{buffer} 为 Buffer 层的弹性模量, GPa 。

根据上述模型, 在各复合材料物性的基础上基于体积百分数混合的方法对棱柱型弥散微封装燃料的物性进行初步等效均匀化计算, 用于燃料元件性能分析。

2 有限元模型及边界条件

本研究使用有限元分析软件 COMSOL 进行燃料元件热流固耦合性能分析, 计算流程如图 1 所示。

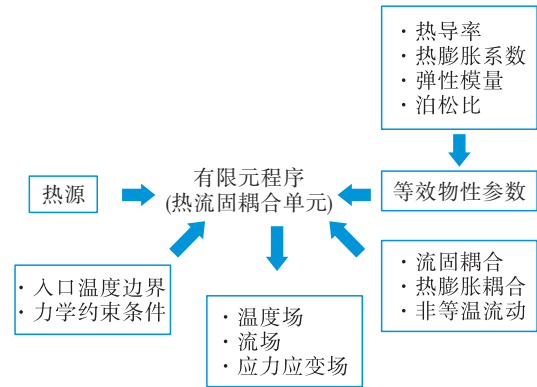


图 1 热流固耦合计算流程

Fig. 1 Thermal-fluid-solid coupling calculation process

选取单个燃料元件进行有限元建模, 如图 2 所示 (视图轴向缩比 1/5)。本研究中主要分析燃料元件寿期初稳态运行工况。参考美国普罗米修斯计划中的氦氘堆设计参数, 冷却剂压力为 2.0 MPa , 每个冷却剂通道的入口假设为充分发展流动, 流体入口温度 $T = 891 \text{ K}$, 流量分别设置为 30 、 40 、 50 kg/s , 出口为压力边界条件。近壁面处绘制边界层网格, 采用壁面函数法进行壁处理。采用 SST 湍流模型模

拟可压缩流体流动。

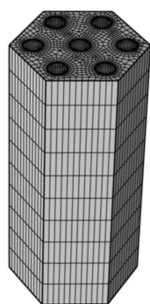


图 2 棱柱型燃料有限元模型

Fig. 2 Finite element model of the prismatic fuel

固体壁面为无滑移边界条件,燃料元件外部绝热;燃料元件底面及对称切割面上设置为对称边界条件(用于模拟燃料元件的轴向及径向热膨胀),其他边界为自由边界条件,热膨胀参考温度假设为室温(300 K)。目前假定功率均匀分布,总功率为 5 MW_t。固体和流体传热模块通过共轭传热技术求解,将流体载荷传递给固体结构实现流固耦合计算,最终实现热-流-固耦合计算。

3 结果分析

针对本研究提出的棱柱型弥散微封装燃料元件,利用有限元分析软件 COMSOL 建立了其热流固耦合分析方法,分别计算分析了燃料元件的温度场及应力应变场等。

3.1 燃料元件温度分布状态

燃料元件的温度分布状态可以评估基体材料的温度裕量,因此,分析燃料元件的温度分布对于评价其安全特性具有重要意义。图 3 为 30、40、50 kg/s 下燃料元件的温度分布。流量越高,基体最高温度越低,分别为 1 340、1 250、1 180 K,均远低于 SiC 材料熔点,无熔化风险。

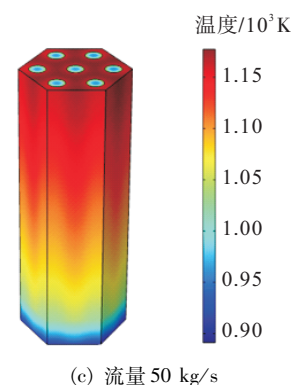
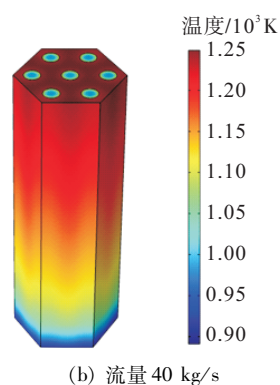
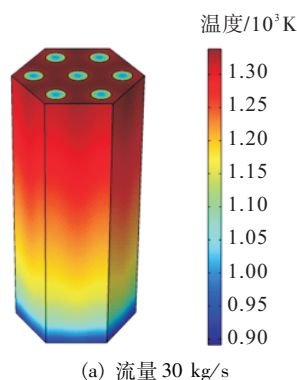
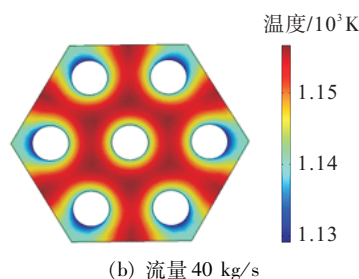
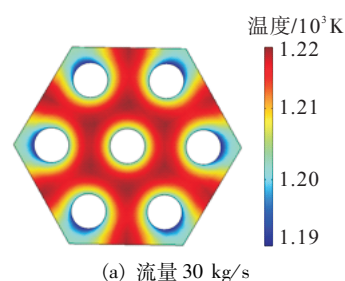


图 3 不同流量下燃料元件温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of fuel elements under different flow rates

图 4 分别为 30、40、50 kg/s 下燃料基体中部截面温度分布云图。从图中可以看出:3 种流量下,六棱柱内部的温度分布相对均匀,而六棱柱 6 个角处的温度分布相对不均匀,主要由排布形式决定。3 种流量下燃料基体中部截面的温差相差不大,温差为 30 K 左右。



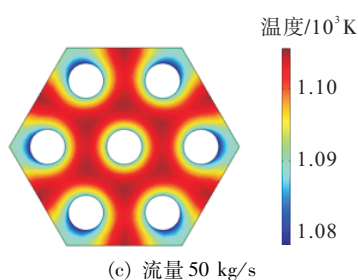


图 4 不同流量下燃料基体中部温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in the middle of the fuel matrix under different flow rates

图 5 分别给出了 30、40、50 kg/s 下的冷却剂温度分布云图。流量越高,冷却剂出口平均温度越低,出口平均温度分别为 1 112.9、1 055.2、1 014.3 K,对应的温升依次为 221.9、164.2、123.3 K。

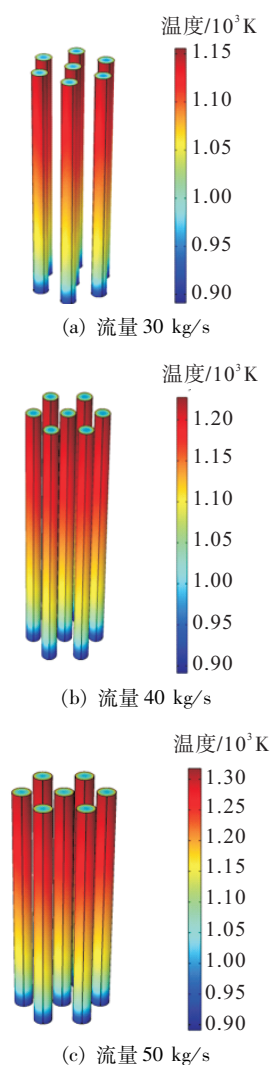


图 5 不同流量下冷却剂温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of coolant under different flow rates

3.2 燃料元件力学行为

燃料元件的应力可以反映元件的高温行为,应力过大会导致元件基体失效,因此研究燃料元件力学行为对于评价其安全性具有重要意义。图 6 分别给出了 30、40、50 kg/s 下燃料元件整体第一主应力分布。结果表明,基体最大主应力出现在冷却剂流道周围,最大主应力最大值为 95.60 MPa,其余位置整体最大主应力较小。最大主应力低于 SiC 材料断裂强度(约 340 MPa)。目前采用的均匀化模型,实际中多层包覆燃料和 SiC 基体间会存在局部应力集中,但预计总体应力也不会超过 SiC 材料断裂强度。

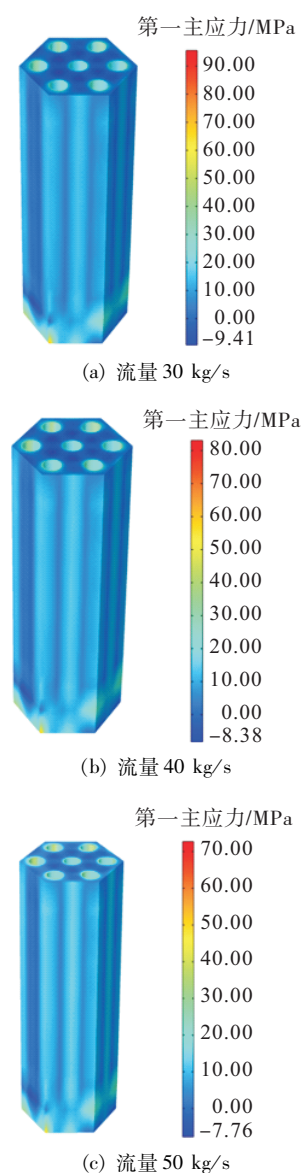


图 6 不同流量下燃料元件应力分布

Fig. 6 Stress distribution of fuel elements under different flow rates

图 7 分别给出了 30、40、50 kg/s 下燃料元件中部截面应力分布云图。从图中可以看出:六棱柱边缘处的应力相比内部更大,主要是由于边缘处温差较大,3 种工况下基体中部的最大主应力相差不大,基本在 30 ~ 40 MPa 之间。

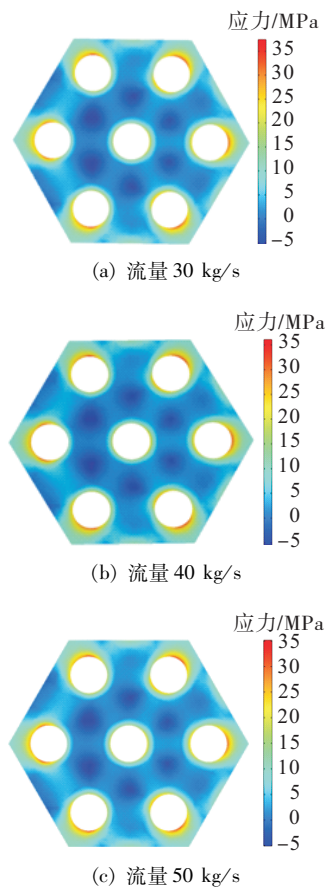


图 7 不同流量下燃料基体中部应力分布

Fig. 7 Stress distribution in the middle of the matrix under different flow rates

表 1 给出了不同流量下的应力和温度计算结果对比。

表 1 计算结果对比

Tab. 1 Comparison of calculation results

流量/ (kg · s ⁻¹)	最大主 应力/MPa	基体最高 温度/K	流体平均 温升/K	流体出口平均 温度/K
30	95.6	1 340	221.9	1 112.9
40	83.1	1 250	164.2	1 055.2
50	72.7	1 180	123.3	1 014.3

4 结论

本研究基于 COMSOL 完成了多孔弥散微封装燃料元件三维热流固耦合性能分析,并开展了不同冷却剂流量下的性能分析,得到主要结论如下。

1) 流量越高,燃料元件最高温度越低,分别为 1 340、1 250、1 180 K,远低于 SiC 材料熔点,无熔化风险。

2) 六棱柱内部的温度分布相对均匀,而六棱柱 6 个角处的温度分布相对不均匀。

3) 基体最大主应力出现在冷却剂流道周围,最大主应力最大值为 95.6 MPa,其余位置整体最大主应力较小,最大主应力低于 SiC 材料断裂强度。

参考文献

[1] MILLER G K, PETTI D A, VARACALLE D J, et al. Statistical approach and benchmarking for modeling of multi-dimensional behavior in TRISO-coated fuel particles [J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 317(1): 69-82.

[2] SEN R S, POPE M A, OUGOUAG A M, et al. Assessment of possible cycle lengths for fully encapsulated microstructure fueled light water reactor concepts [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 255: 310-320.

[3] KING J C, EL-GENK M S. Submersion-subcritical safe space (S₄) reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(17): 1759-1777.

[4] ASHCROFT J, ESHELMAN C. Summary of NR program Prometheus efforts [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2007.

[5] ASHCROFT J, BELANGER S, BURDGE W, et al. Key factors influencing the decision on the number of brayton units for the Prometheus space reactor [C]//AIP Conference. Albuquerque, New Mexico: AIP, 2007.

[6] KING J C, EL-GENK M S. Thermal-hydraulic and neutronic analyses of the submersion-subcritical, safe space (S₄) reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(12): 2809-2819.

[7] BETZLER B R, ADE B J, JAIN P K, et al. Conceptual design of the transformational challenge reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 196(12): 1399-1424.

[8] TERRANI K A, JOLLY B C, TRAMMELL M P, et al. Architecture and properties of TCR fuel form [J]. Journal of Nuclear Materials, 2021, 547: 152781.

- [9] BURNS J R, BETZLER B R, ADE B, et al. Control element design for the transformational challenge reactor [R]. TN 37831.
- [10] BYUN T, GUSSEV M, LACH T, et al. Mechanical properties and deformation behavior of additively manufactured 316L stainless steel (FY2020)[Z]. 2020.
- [11] KOYANAGI T, TERRANI K, HARRISON S, et al. Additive manufacturing of silicon carbide for nuclear applications [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2021, 543: 152577.
- [12] WOOLSTENHULME N, CHAPMAN D, CORDES N, et al. TREAT testing of additively manufactured SiC canisters loaded with high density TRISO fuel for the Transformational Challenge Reactor project [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2023, 575: 154204.
- [13] 李杨柳, 赵守智, 孙征, 等. 氦氩混合气体冷却反应堆单通道程序开发[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(1): 41-45.
- LI Y L, ZHAO S Z, SUN Z, et al. Development of single channel program for helium and xenon mixture cooled reactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(1): 41-45.
- [14] 杨谢, 石磊. 空间核反应堆电源闭式 Brayton 循环热力学分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2018, 58(9): 821-826.
- YANG X, SHI L. Thermodynamic analysis of closed Brayton cycles for space reactor power system [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2018, 58(9): 821-826.
- [15] BECK J M, PINCOCK L F. High temperature gas-cooled reactors lessons learned applicable to the next generation nuclear plant [Z]. 2011.
- [16] 刘仕超, 李权, 黄永忠, 等. 中空六棱柱燃料元件热力学性能研究[J]. *核动力工程*, 2022, 43(5): 133-137.
- LIU S C, LI Q, HUANG Y Z, et al. Research on the thermal-mechanical performance of hollow hexagonal fuel element [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2022, 43(5): 133-137.
- [17] 刘仕超, 周毅, 李垣明, 等. 多物理场耦合 TRISO 颗粒堆内行为研究[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(Sup. 1): 100-108.
- [18] LUCUTA P G, MATZKE H, HASTINGS I J. A pragmatic approach to modelling thermal conductivity of irradiated UO_2 fuel: review and recommendations [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, 232(2/3): 166-180.
- [19] SNEAD L L, NOZAWA T, KATOH Y, et al. Handbook of SiC properties for fuel performance modeling [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 371(1/2/3): 329-377.
- [20] POWERS J J, WIRTH B D. A review of TRISO fuel performance models [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2010, 405(1): 74-82.