

气冷快堆燃料组件设计及中子学特性分析

周梦飞 刘国明 霍小东
(中国核电工程有限公司 北京 100840)

摘要 气冷快堆兼具高温气冷堆的经济性和快堆的可持续性等优点,在四代堆型中具有独特的技术优势。为了适应气冷快堆高温、高中子通量的堆芯环境,本文基于耐事故燃料模型,提出了一种块状气冷快堆燃料组件设计方案,并对该组件中铀钚混合燃料中的钚含量、冷却孔道的直径及数量、栅距比、包壳及组件盒厚度等物理参数对中子学特性的影响规律开展了敏感性分析研究。分析结果表明:在研究的6个参数中,钚含量和栅距比对组件的中子学特性影响最大,冷却孔道数量主要影响组件内的功率分布,其余参数对组件中子学特性几乎无影响。最后针对块状燃料组件低冷却剂份额的特点,利用单通道模型进行组件内的温度分布计算,给出了热工限值对组件参数的要求。

关键词 气冷快堆, 块状组件, 颗粒弥散燃料, 中子学特性, 敏感性分析, 单通道模型

中图分类号 TL329⁺.2, TL43⁺3, TL424

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050601

Design and neutronics characteristics analysis of the fuel assembly in gas-cooled fast reactor

ZHOU Mengfei LIU Guoming HUO Xiaodong
(China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract [Background] The gas-cooled fast reactor (GFR) has great advantages of finance and sustainability which combines the features of high temperature gas-cooled reactor and fast reactor. However, safety issue has become the main challenge in the development of GFR due to the high temperature and high neutron flux in the GFR core. Coated particle fuel (CPF) has been widely used in high temperature reactor (HTR) due to the excellent high temperature tolerance. [Purpose] In order to strengthen the safety property in GFR, this paper puts forward a block-type fuel assembly (FA) model based on CPF. Based on the FA model, neutronics analysis and thermal hydraulics validation is carried out to verify the rationality of the design. [Methods] Monte Carlo method is used in the calculation. Physical parameters including plutonium fraction in the U-Pu mixture fuel, diameter of fuel pins/coolant channels, the number of coolant channels, pitch-to-diameter ratio, thickness of cladding and thickness of assembly wrapper were selected and sensitivity analysis were conducted on the FA property to these parameters. [Results] Analysis results show that among the above six parameters, plutonium fraction and pitch-to-diameter ration have the most obvious effect on the neutronic property and the number of the coolant channels mainly influences the power distribution of the GFR FA. Finally, temperature distribution of the FA is calculated using single channel model under a low coolant fraction and requirements in terms of thermal-hydraulic property are put forward for the FA parameters. [Conclusions] The block-type FA model put forward in this paper meets the design requirements well. The research conclusion of this paper provides reference for the future study on GFR nuclear design.

第一作者: 周梦飞, 女, 1995年出生, 2018年于核工业第二研究设计院获硕士学位, 研究领域为反应堆物理

通信作者: 刘国明, E-mail: liugma@cnpe.cc

收稿日期: 2022-07-20, 修回日期: 2022-11-30

First author: ZHOU Mengfei, female, born in 1995, graduated from China Nuclear Power Engineering with a master's degree in 2018, focusing on reactor physics

Corresponding author: LIU Guoming, E-mail: liugma@cnpe.cc

Received date: 2022-07-20, revised date: 2022-11-30

Key words Gas-cooled fast reactor, Block-type fuel assembly, Coated particle dispersion fuel, Neutronics characteristics, Sensitivity analysis, Single channel model

第四代核能系统论坛(Generation IV International Forum, GIF)提出了包括超高温气冷堆(Very High Temperature Reactor, VHTR)、钠冷快堆(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)、气冷快堆(Gas-cooled Fast Reactor, GFR)等在内的6种堆型技术。其中气冷快堆作为一种使用气体冷却剂的快堆,既具备快堆的增殖、嬗变等可持续性优势,又能实现高温气冷堆的高循环效率等特点。但气冷快堆堆芯内高功率密度、高温的特点与气体冷却剂载热能力低之间的矛盾,又使气冷快堆面临安全性的严峻挑战。中子通量高、能谱更硬等特点使气冷快堆具有比常规压水堆和钠冷快堆更加恶劣的辐照环境,也对燃料提出了更为严苛的要求。因此,开展不同类型燃料材料和燃料元件结构的设计和验证成为气冷快堆堆芯设计的重要环节^[1-2]。根据目前国际上气冷快堆燃料的研发进展,燃料化合物的选择有可裂变材料的氧化物、碳化物、氮化物等,包壳材料则主要考虑碳化硅及其纤维复合材料SiC/SiC_f^[3],燃料元件形式有传统的均匀燃料和弥散体燃料等,燃料组件结构有棒束状、板状、块状等形式^[4-8]。其中,包覆颗粒弥散体燃料作为耐事故燃料(Accident Tolerant Fuel, ATF)的重要研究方向之一^[9-11],对于提升气冷快堆堆芯安全性具有积极意义。

然而,由于包覆颗粒燃料中多层包覆层以及基材材料占据了燃料的主要体积,使用包覆颗粒燃料进行气冷快堆堆芯核设计面临着燃料装载量低、剩余反应性小的问题。为了应对这一问题,可采取降低冷却剂体积份额以增加燃料装载量的设计思路。美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)的实验结果表明,采用一种反转的块状燃料结构能够在较低的冷却剂份额下(约为25%)达到足够的冷却能力^[12]。因此,本文提出一种基于包覆颗粒燃料的块状燃料组件模型。由于GFR能谱更硬、中子泄漏率更高,初始反应性更小,因而本文在进行组件设计优化时以增大初始反应性、延长组件寿命为主要优化目标,在此基础上进一步考虑了组件内的功率分布和温度限值等。在本文的分析中选取了包含钚同位素份额、栅距比等在内的6项关键物理参数,使用三维蒙特卡罗程序RMC^[13]研究这些参数对组件中子学特性的影响规律,在此基础上进一步确定优化的组件设计方案。

1 燃料组件设计方案

借鉴于高温气冷堆的设计经验,本文提出了一种六棱柱块状结构的燃料组件(Fuel Assembly, FA)模型。燃料选用包覆颗粒弥散体燃料,以提升堆芯的固有安全性。弥散体燃料被制成均匀六角形块,其上按照正三角形方式排列冷却剂通道。整个燃料组件呈蜂窝煤状,结构示意图如图1(a)所示。

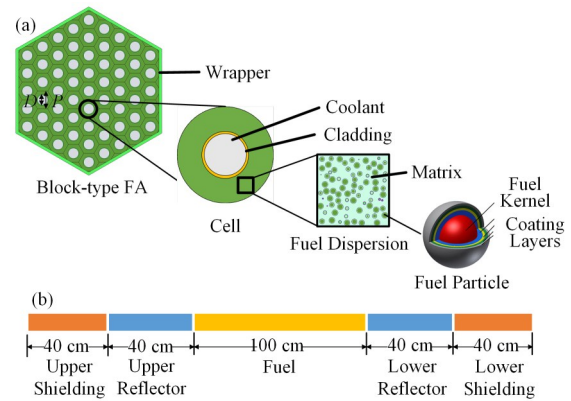


图1 块状燃料组件结构示意图 (a) 径向, (b) 轴向
Fig.1 Structural diagram of the block-type FA (a) Radial, (b) Axial

表1 块状组件基本参数
Table 1 Parameters of the block-type assembly

组件参数 Parameters	值 Values
单组件功率 Power / MW	2
组件对边距 Edge-to edge distance / cm	21.035
冷却剂体积份额 Coolant fraction / %	30
钚同位素份额 Plutonium fraction/ wt%	30
冷却剂通道数 Number of coolant channels	5R(61)
冷却剂通道直径 Diameter of coolant channels / mm	15
栅距比 Pitch-to diameter ration	1.74
包壳厚度 Clad thickness / mm	0.75
组件盒厚度 Wrapper thickness / mm	2

表1给出了块状燃料组件的基本设计参数,部分参数参考了日本的CPF堆芯^[14],功率密度约为 $50 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-3}$ 。表中冷却剂体积份额是指单组件内氦气冷却剂占整个燃料组件的体积份额,栅距比是指冷却剂通道直径与相邻通道中心距的比值。单组件热功率设计为2 MW,组件温度设定为1 000 K,可用于后续进行百兆瓦量级模块化气冷快堆的堆芯方案设计。组件设计为六棱柱块状,轴向自下而上分别为:下屏蔽层、下反射层、燃料区、上反射层、上屏蔽层,轴向示意图如图1(b)所示。为适应气冷快堆堆

芯的高温环境而采用全陶瓷材料的组件设计,燃料采用95%理论密度的碳化铀钚陶瓷燃料((U,Pu)C),包壳和组件盒材料为碳化硅(SiC),轴向反射层和屏蔽层材料分别为硅化锆(Zr₃Si₂)和碳化硼(B₄C)。冷却剂为惰性气体氦气(He)。在RMC程序中建立单组件模型,组件在径向采用全反射边界条件,轴向上采用真空边界条件。核截面使用NJOY程序制作基于ENDF/B7.1评价数据文件的ACE格式截面库。通过燃耗计算分析来研究各项参数对组件中子学特性的影响。

2 组件中子学参数敏感性分析

2.1 钚同位素份额

组件中所使用的核燃料为铀钚混合碳化物,其中铀为天然铀,钚的同位素组成采用冷却10 a后的压水堆乏燃料,同位素质量分数为:²³⁸Pu(2.34wt%)、²³⁹Pu(58.15wt%)、²⁴⁰Pu(23.06wt%)、²⁴¹Pu(9.54wt%)、

²⁴²Pu(5.62wt%)、²⁴¹Am(1.30wt%)^[15]。令燃料中钚同位素份额在25~30 wt%变化,计算燃料组件的有效增殖因子 k_{eff} 随燃耗时间的变化曲线,并计算组件寿期的变化情况,燃耗曲线和寿期计算结果分别示于图2和表2。

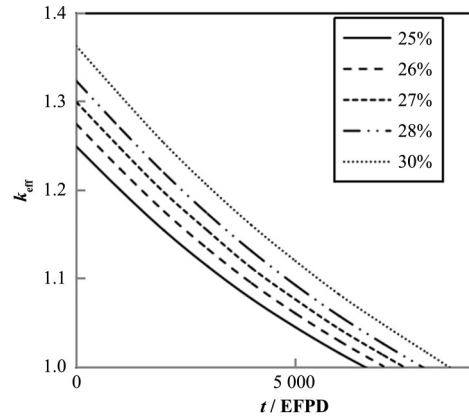


图2 组件燃耗随钚份额的变化情况
Fig.2 Change of FA burnup with different plutonium fractions

表2 不同钚同位素含量条件下的组件寿命
Table 2 Lifetime of FA with different plutonium fractions

钚同位素份额Plutonium fraction / wt%	25	26	27	28	30	
组件寿命/EFPD Lifetime/EFPD	6 514	6 960	7 400	7 858	8 516	
转换比 Conversion ratio	寿期初 Beginning of cycle	0.721 7	0.712 1	0.703 4	0.693 7	0.676 3
	寿期末 End of cycle	0.773 7	0.768 9	0.770 1	0.764 8	0.756 3

根据图2的燃耗计算结果来看,在不同的钚份额条件下组件燃耗曲线的变化趋势基本相同。计算结果表明,钚份额对组件的初始 k_{eff} 和寿期都具有明显影响,钚含量在28%以下时,钚含量每下降1%,初始 k_{eff} 下降约 2.5×10^{-2} ,寿期约减少500 EFPD(Effective Full Power Day,有效满功率天数)。而当钚含量从28%提高至30%时,寿期仅增加了600 EFPD,这主要是因为钚份额的增加导致组件的增殖性能有所下降,表2中还统计了寿期初(Beginning of Cycle,BOC)和寿期末(End of Cycle,EOC)不同钚份额组件的转换比CR,CR定义为易裂变核素的产生与消耗之比,计算公式如式(1)所示:

$$CR = \frac{R_{a,38} + R_{a,40}}{R_{t,35} + R_{t,39} + R_{t,41}} = \frac{\Sigma_{a,38} + \Sigma_{a,40}}{\Sigma_{t,35} + \Sigma_{t,39} + \Sigma_{t,41}} \quad (1)$$

式中:下标 a 和 t 分别表示吸收截面和总反应截面,数字35、38、39、40、41分别代表核素²³⁵U、²³⁸U、²³⁹Pu、²⁴⁰Pu、²⁴¹Pu。从计算结果可以看出,组件转换比随钚份额的增加而减小。当钚份额超过27%以后,组件

的转换比降低至0.7以下,这主要是因为本文所用燃料中对CR值影响最大的为²³⁸U的吸收截面,钚份额增大导致²³⁸U的核素密度减小,CR值下降。综合考虑组件寿期和转换比而选择27%的燃料钚份额。

2.2 冷却剂通道直径

在研究冷却剂通道直径 D 对组件中子学特性的影响时,为了控制单一变量,而令栅距比 P/D 值保持不变,使组件对边距、包壳及组件盒厚度随直径成比例变化。由于这会直接导致组件内燃料装载量的变化,因而在分析时需将这一点考虑在内。由于栅距 P 将随 D 等比例变化,因而 D 值过大会导致 P 相应增大,从而使传热恶化,而 D 值过小则会导致燃料装载量不足,因而本文将 D 的取值定为12~21 mm。不同直径 D 下对应的组件参数列于表3,组件燃耗曲线如图3所示。寿期的计算结果列于表3。

图3中冷却剂通道直径 D 的不同取值对应的组件燃耗曲线的起点相差不大,说明 D 的变化对组件的初始 k_{eff} 影响不大。由此可进一步说明,在径向全

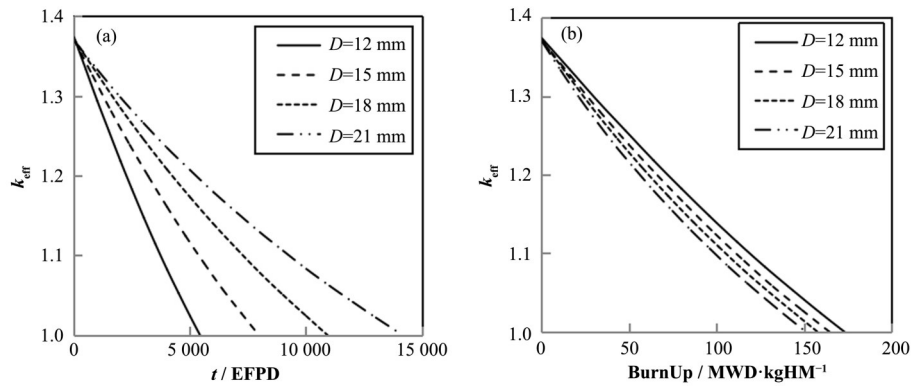


图3 组件燃耗随冷却剂通道直径的变化情况
(a) 组件有效增殖因子随燃耗天数的变化, (b) 组件有效增殖因子随燃耗深度的变化
Fig.3 Change of FA burnup with different diameter values of the coolant channels
(a) k_{eff} value changes with burnup days, (b) k_{eff} value changes with burnup depth

表3 不同冷却剂通道直径下的组件寿期
Table 3 FA lifetime with different diameter values of the coolant channels

冷却剂通道直径 Diameter / mm	12	15	18	21
燃料装载量 Fuel loading / kg	63	97	139	188
组件对边距 Edge-to-edge distance / cm	16.894	21.035	25.191	29.340
组件寿期/EFPD Lifetime/EFPD	5 433	7 968	10 930	14 165

反射边界条件下,影响组件的初始反应性的因素主要是组件内各材料成分所占的比例份额,而不是组件的绝对尺寸和燃料装载量。表3中组件寿期随 D 的增大而明显延长,这主要是由于燃料装载量增加、比燃耗降低的结果。

从图3(b)中的燃耗曲线还可以看出,越小的直径对应组件的燃耗曲线下降越缓慢,说明减小冷却剂通道的直径有利于块状燃料组件实现更好的增殖性能。因而本文将冷却剂通道直径 D 取为12 mm。

2.3 冷却剂通道数量

不同冷却剂通道数量 N 是通过改变六角形组件块内冷却剂通道按照正三角形排列的圈数 R 得到(圈数统计时含中心通道)。研究时令冷却剂通道的直径 D 随其数量 N 而变化,以保持组件内的燃料装载量不变,从而验证组件内不同的燃料分布形式对组件中子学特性的影响。燃耗曲线计算结果如图4所示,表4给出了不同的燃料分布形式下组件寿期的计算结果。由于不同的燃料分布形式主要影响组件内的径向功率分布情况,因而在表4中给出了不

同冷却剂通道数量 N 对应的径向功率峰因子的计算结果。

图4中组件的几条燃耗曲线差别很小,几乎重合;表4中的组件寿期计算结果也都在8 000 EFPD上下,说明组件内不同的燃料分布形式对组件的初始 k_{eff} 及组件寿期几乎无影响,这也进一步印证了§2.2的结论。而对径向功率峰因子的计算结果也表明, N 值越大,相同冷却剂份额条件下冷却剂在组件内的分布越均匀,有利于展平组件内的径向功率分布,降低径向功率峰因子。 N 的优化取值需要进一步结合热工分析结果后给出。

2.4 栅距比

组件内栅距比(Pitch-to-Diameter ratio, P/D)的大小直接决定了组件内冷却剂所占的体积比例(Coolant Fraction, CF)。块状组件的栅距比与冷却剂体积份额之间的对应关系列于表5。不同栅距比对应组件的燃耗曲线如图5所示,表5最后一行中给出了对应的组件寿期的计算结果。

图5中组件在不同栅距比下的燃耗曲线变化趋

表4 不同冷却剂通道数量下的组件寿期
Table 4 FA lifetime with different numbers of the coolant channels

冷却剂通道数量 Number of the coolant channels	4R (37)*	5R (61)	6R (91)	7R (127)
组件寿期/EFPD Lifetime/EFPD	8 035	7 968	7 931	8 098
径向功率峰因子 Radial power peaking factor	1.019 0	1.012 4	1.009 3	1.006 9

注: * 括号内为冷却剂通道的具体数量

Note: * The value in the brackets means the number of coolant channels

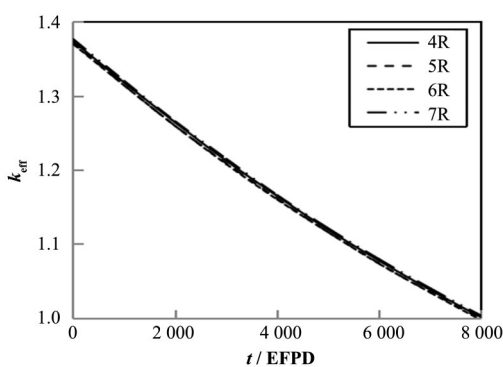


图4 组件燃耗随冷却剂通道数量的变化情况

Fig.4 Change of FA burnup with different numbers of the coolant channels

表5 不同栅距比条件下的组件寿命
Table 5 FA life with different pitch-to-diameter ratios

栅距比 P/D	1.90	1.74	1.61	1.51
冷却剂体积份额 Coolant fraction / %	25	30	35	40
组件寿命/EFPD Lifetime/EFPD	8 747	7 968	7 111	6 245

势大致相同,但栅距比的变化导致了组件初始 k_{eff} 的明显变化,从而对组件寿命产生了明显影响。由 §2.2 的结论可知,栅距比是通过改变组件内的燃料体积份额而对组件初始反应性和组件寿命产生影响的。根据图5和表5中的计算结果,CF每增大5%,组件初始 k_{eff} 减小 $(3.3\sim 3.8)\times 10^{-2}$,组件寿命缩短约 800 EFPD。由于栅距比的具体取值对组件内的传

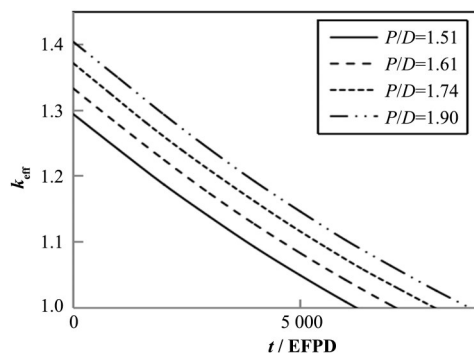


图5 组件燃耗随栅距比的变化情况

Fig.5 Change of FA burnup with different pitch-to-diameter ratios

热性能有直接影响,因而 P/D 值将在结合热工分析结果后给出。

2.5 包壳及组件盒厚度

包壳和组件盒材料均为耐高温的碳化硅陶瓷材料,是组件内慢化成分碳原子C的主要来源之一,对组件中子学特性的影响不可忽视。在进行包壳及组件盒厚度的敏感性分析时,令组件内其余物理参数均保持在基准值,而仅改变包壳/组件盒的厚度值。包壳厚度的变化仅引起组件内碳化硅材料的比例变化,组件盒厚度变化时除了改变碳化硅的体积比,还会引起燃料体积份额的微小波动。不同包壳/组件盒厚度对应两种组件的燃耗曲线如图6所示,寿命计算结果列于表6、7。

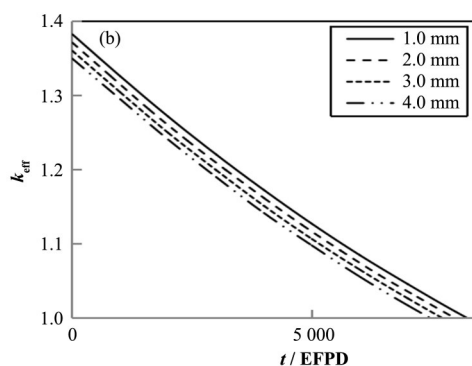
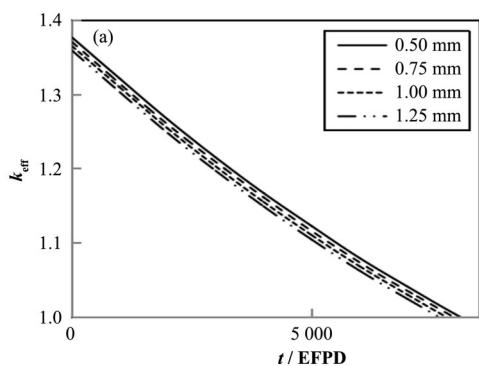


图6 组件燃耗随冷却剂通道包壳厚度(a)和组件盒厚度(b)的变化情况

Fig.6 Change of FA burnup with different cladding thickness of the coolant channels (a) and different wrapper thickness (b)

表6 不同冷却剂通道包壳厚度和组件盒厚度下的组件寿命
Table 6 FA life with different cladding thickness of the coolant channels and different wrapper thickness

包壳厚度 Clad thickness / mm	0.50	0.75	1.00	1.25
组件寿命/EFPD lifetime / EFPD	8 109	7 968	7 817	7 669
组件盒厚度 Wrapper thickness / mm	1.0	2.0	3.0	4.0
组件寿命/EFPD Lifetime / EFPD	8 232	7 968	7 712	7 464

图6的燃耗计算结果显示,包壳和组件盒厚度变化时,通过改变组件内碳化硅材料的体积占比而对组件的初始反应性产生了一定影响。包壳厚度每增大0.1 mm,组件的初始 k_{eff} 下降 2.4×10^{-3} 左右,寿命减少约 60 EFPD;组件盒厚度每增加 1 mm,组件的初始 k_{eff} 降低 1.1×10^{-2} 左右,寿命约减少 260 EFPD。从中子学性能和结构稳定性两方面因素考虑,本文将包壳厚度定为 0.6 mm,组件盒厚度为 2 mm。

上述针对组件中子学参数的敏感性分析结果表明,块状燃料组件中适当增大轴钷燃料中的钷份额、增大栅距比等手段能够得到更大的组件初始反应性,而采用较小的钷份额、减小冷却剂通道直径有利于提高组件的增殖性能。此外,冷却剂通道的直径和数量分布不仅直接影响组件内的功率分布,也会影响组件的传热能力,选择较小的冷却剂通道直径以及冷却剂体积份额会导致组件的传热性能下降,从而降低组件的安全性。因此需要进一步对优化后的组件模型进行热工参数的计算分析,以验证组件方案的能否满足安全性要求。

3 组件热工特性分析

为了验证在较低的冷却剂份额条件下块状组件的冷却能力,对组件的轴向温度分布进行了计算分析。首先计算组件的温度系数,以研究组件的物理特性与热工特性之间的耦合程度。在设计温度 1 000 K 条件下,采用有限差分方法计算组件内燃料的多普勒温度系数,以及包括多普勒系数在内的全组件的温度系数,计算结果分别为 $-0.821 0 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 和 $-1.007 5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$,比一般压水堆的多普勒系数小得多,这主要是由于快堆组件的平均中子能量更高、

共振区中子数更少所致。这表明组件的热工性质对物理特性的反馈效应很小,在对热工特性的计算精度要求不高的情况下,物理和热工参数可以解耦计算,无须多次迭代,减小了计算量。

气冷快堆采用气体冷却剂,无须考虑冷却剂沸腾的问题,热工计算时主要考虑燃料温度能否满足限值要求。本文参考 TRISO 型包覆颗粒燃料的温度限值(约为 1 473 K)来分析组件的温度分布,包覆颗粒弥散燃料的热导率按照麦克斯韦-加内特(Maxwell-Garnett)模型^[16]进行等效处理,计算时将六角形栅元按面积等效为圆柱,采用单通道模型计算块状组件内单栅元的传热情况。根据傅里叶导热定律,影响传热特性的主要因素是组件栅距比,因而计算了不同栅距比条件下燃料的最高温度,计算结果列于表 7;同时由于冷却剂通道的数量 N 会对径向功率峰因子产生影响,进而影响组件内的温度分布,因而对不同栅距比给出以 1 473 K 为限值的径向功率峰因子,作为冷却剂通道数量 N 的筛选标准,根据表 4 中 N 值所对应的组件径向功率峰因子应不超过表 7 中所给限值。综合考虑功率分布、温度限值和组件寿期,本文将栅距比的值取为 1.74,对应 30% 的冷却剂体积份额,冷却剂通道数量为 127 个(7R)。

表 7 不同栅距比条件下的栅元最高温度
Table 7 Cell peak temperature with different pitch-to-diameter ratios

P/D	1.90	1.74	1.61	1.51
冷却剂体积份额 Coolant fraction / %	25	30	35	40
燃料最高温度 Peak temperature / K	1 468	1 444	1 423	1 407
径向功率峰因子限值 Power peak factor limit	1.003 7	1.019 5	1.034 8	1.047 0

根据表 7 的计算结果来看,单栅元模型的燃料最高温度在所选的不同栅距比条件下均满足限值。但考虑组件内的功率分布后,栅距比为 1.90、即冷却剂体积份额 CF 为 25% 时,燃料最高温度十分接近限值,对功率展平的要求十分苛刻,图 7 给出了对应条件下组件的轴向温度分布情况,图中竖线表示燃料温度限值。从计算结果可以看出,由于气体冷却剂的导热性能低,因而冷却剂与包壳内壁面之间存在较大温升,最大对流温差超过 330 K。包壳材料碳化硅具有较好的导热能力,因而包壳内外的温差较小,约为 25 K;燃料块最大导热温差约为 140 K。燃料的最大温度出现在上层,这是由于组件内采用同种燃料、轴向功率近似余弦分布,与冷却剂自下而上流动共同作用的结果。在后续研究中通过轴向燃料分区布置的方式可进一步展平轴向功率分布,从而获得更大的热工安全裕量。

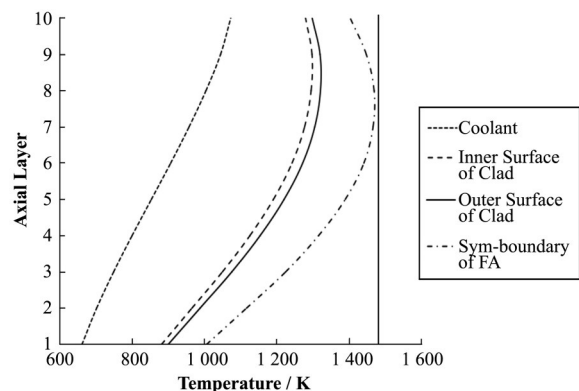


图 7 组件轴向温度分布
Fig.7 Axial temperature distribution of FA

4 结语

本文针对气冷快堆堆芯设计中面临的安全性挑战,以及快堆堆芯中的高泄漏率问题,提出了一种适用于气冷快堆堆芯的燃料组件设计方案。该方案采

用改进的包覆颗粒燃料,具有良好的耐高温性能和裂变产物包容能力,同时采用“反转式”的块状组件结构,具有很好的传热性能。并以提高组件的初始反应性、延长组件寿期为主要优化目标,用蒙特卡罗程序RMC对组件的多项中子学参数进行了敏感性分析。研究结论主要有以下几点:

1) 组件在零燃耗时的有效增殖因子主要受燃料及冷却剂的体积份额影响,受燃料装载量的影响不大。当组件内燃料及冷却剂的体积占比保持不变时,组件的初始反应性几乎不随燃料装载量的变化而变化。燃料及冷却剂体积份额主要由栅距比决定,在满足安全性要求的前提下,可选择较小的冷却剂体积份额,即较大的栅距比,以获得更大的初始反应性。

2) 铀钚燃料中的钚份额对组件的中子学特性具有明显影响。钚份额直接影响了组件内的易裂变核素比例,燃料中的钚份额越高,组件初始 k_{eff} 越大,组件寿期越长;但钚份额的增加也会引起组件转换比的下降,因而燃料中钚份额的选择应考虑设计需求。对大堆来说可选择较低的钚份额以获得更好的增殖性能,而对于小堆可选择较高的钚份额以获得更高的初始反应性。

3) 块状组件中的冷却剂通道直径及数量对组件的初始 k_{eff} 几乎无影响。其中通道直径的变化直接改变了组件内的燃料装载量,在组件热功率恒定的条件下通过改变燃料的比燃耗从而对组件寿期产生影响,冷却剂通道的直径越大,组件寿期越长。而通道数量的改变主要改变了组件内的燃料分布方式,这会引起组件内径向功率分布情况及径向功率峰因子的变化,通道数量越多,径向功率分布越均匀;而组件内燃料及冷却剂的体积占比不发生变化,因而对组件的初始反应性几乎不产生影响。在满足工艺要求的条件下,可选择更多(相应直径越小)的冷却剂通道数量来得到更加平坦的径向功率分布。

4) 包壳及组件盒厚度的变化会引起组件内相应结构材料碳化硅的体积占比发生一定范围的波动,并对组件的初始 k_{eff} 和组件寿期产生一定影响,但总体来说影响不大。

气冷快堆的组件设计需充分考虑中子学特性、热工安全特性、工艺制造等因素的影响。本文分析了组件内主要参数对中子学特性及热工特性的影响规律,上述研究规律可为气冷快堆组件设计提供指导,同时也便于进一步进行堆芯的设计与优化。

作者贡献声明 周梦飞负责方案设计,实验设计及实施研究,实验数据采集、统计分析和解释处理,文章起草和修改完善等;刘国明、霍小东负责对文章做

批评性审阅和校核,并提供技术指导。

参考文献

- 1 Hejzlar P, Pope M J, Williams W C, *et al.* Gas cooled fast reactor for generation IV service[J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 47(1 - 4): 271 - 282. DOI: 10.1016/j.pnucene.2005.05.077.
- 2 黄彦平, 臧金光. 气冷快堆概述[J]. 现代物理知识, 2018, 30(4): 40 - 43. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.010.
HUANG Yanping, ZANG Jinguang. Overview of gas-cooled fast reactor[J]. Modern Physics, 2018, 30(4): 40 - 43. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.010.
- 3 Čížek J, Kalivodová J, Janeček M, *et al.* Advanced structural materials for gas-cooled fast reactors—a review [J]. Metals, 2021, 11(1): 76. DOI: 10.3390/met11010076.
- 4 Fukuda K, Ogaw T, Hayashi K, *et al.* Research and development of HTTR coated particle fuel[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1991, 28(6): 570 - 581. DOI: 10.1080/18811248.1991.9731396.
- 5 Charpentier L, Dawi K, Balat-Pichelin M, *et al.* Chemical degradation of SiC/SiC composite for the cladding of gas-cooled fast reactor in case of severe accident scenarios[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 127 - 135. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.02.019.
- 6 Idris M I, Konishi H, Imai M, *et al.* Neutron irradiation swelling of SiC and SiC_f/SiC for advanced nuclear applications[J]. Energy Procedia, 2015, 71: 328 - 336. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.11.886.
- 7 Petkevich P, Mikityuk K, Coddington P, *et al.* Comparative transient analysis of a gas-cooled fast reactor for different fuel types[C]//Proceedings of ICAPP'06. Reno, USA, 2006. DOI: 10.1088/1742-6596/1772/1/012031.
- 8 Fielding R, Meyer M, Jue J F, *et al.* Gas-cooled fast reactor fuel fabrication[J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 371(1 - 3): 243 - 249. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2007.05.011.
- 9 Chen S L, He X J, Yuan C X. Recent studies on potential accident-tolerant fuel-cladding systems in light water reactors[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, 31(3): 32. DOI: 10.1007/s41365-020-0741-9.
- 10 王诗倩, 李庆, 陈长, 等. FCM燃料研究进展[J]. 科技创新导报, 2019, 16(23): 104 - 108. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098X.2019.23.104.
WANG Shiqian, LI Qing, CHEN Chang, *et al.* Research

- progress of FCM fuel[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, **16**(23): 104 - 108. DOI: [10.16660/j.cnki.1674-098X.2019.23.104](https://doi.org/10.16660/j.cnki.1674-098X.2019.23.104).
- 11 周毅, 刘仕超, 陈平, 等. FCM燃料堆内行为模拟及结构设计研究[J]. 核动力工程, 2020, **41**(5): 197 - 200. DOI: [10.13832/j.jnpe.2020.05.0197](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2020.05.0197).
ZHOU Yi, LIU Shichao, CHEN Ping, *et al.* In-pile performance simulation and structure design of fully ceramics microencapsulated fuel[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, **41**(5): 197 - 200. DOI: [10.13832/j.jnpe.2020.05.0197](https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2020.05.0197).
- 12 Pope M A, Lee J I, Hejzlar P, *et al.* Thermal hydraulic challenges of Gas Cooled Fast Reactors with passive safety features[J]. Nuclear Engineering and Design, 2009, **239**(5): 840 - 854. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2008.10.023](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.023).
- 13 刘仕倡. 基于RMC的反应堆全寿期高保真模拟与随机介质精细计算[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- LIU Shichang. Reactor high fidelity life-cycle simulation and precise calculation of stochastic media based on RMC code[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- 14 Sugino Kazuteru, Rimpault Gerald, Hayashi Hideyuki. JNC-CEA GCFR core neutronic benchmark[R]. Japan: Japan Nuclear Cycle Development Institute, 2005.
- 15 刘国明, 郭治鹏. HPR1000堆芯装载50% MOX组件的燃料管理方案[J]. 强激光与粒子束, 2017, **29**(3): 036010. DOI: [10.11884/HPLPB201729.160376](https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160376).
LIU Guoming, GUO Zhipeng. Fuel loading pattern with 50% MOX fuel in HPR1000 core[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, **29**(3): 036010. DOI: [10.11884/HPLPB201729.160376](https://doi.org/10.11884/HPLPB201729.160376).
- 16 Boer B, Sen R S, Pope M A, *et al.* Material performance of fully-ceramic micro-encapsulated fuel under selected LWR design basis scenarios: final report[R]. Idaho National Laboratory, 2011.