



## 基于HFETR的快堆燃料短棒辐照试验方案设计与分析

张亮, 杨文华, 赵文斌, 孙胜, 金帅, 雷晋

### Design and Analysis of Irradiation Test Scheme for Fast Reactor Fuel Slug with HFETR

Zhang Liang, Yang Wenhua, Zhao Wenbin, Sun Sheng, Jin Shuai, and Lei Jin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0101>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 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

#### 板型燃料元件反应堆瞬态热工水力分析程序的开发与验证

Development and Verification of Thermal–Hydraulic Transient Analysis Code in Plate–Type Fuel Nuclear Reactor

核动力工程. 2019, 40(5): 18–22

#### 燃料试样堆内辐照温度设计与实验研究

Design and Experimental Study of Irradiation Temperature in Fuel Specimen

核动力工程. 2018, 39(6): 43–48

#### 铅铋快堆螺旋管直流蒸汽发生器热工水力特性数值研究

Numerical Investigation on Thermal Hydraulics of Helical Coil Tube Once Through Steam Generator for LBE Fast Reactor

核动力工程. 2021, 42(4): 21–26

#### 六边形套管型燃料堆芯临界物理试验方案设计研究

Design and Study of Critical Physical Test Scheme for Core with Hexagonal Jacketed Fuel

核动力工程. 2021, 42(5): 256–260

#### 小型铅-铋冷却快堆提棒事故核热耦合研究

Coupled Neutronics and Thermal–Hydraulics Simulation of RIA for Small LBE–Cooled Fast Reactor

核动力工程. 2019, 40(2): 184–188



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)03-0101-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.03.0101

# 基于 HFETR 的快堆燃料短棒辐照 试验方案设计与分析

张 亮, 杨文华, 赵文斌, 孙 胜, 金 帅, 雷 晋

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要:** 综合考虑辐照试验指标与燃料试验安全、高通量工程试验堆 (HFETR) 运行要求、试验段压差波动等因素, 基于 HFETR 开展了快堆燃料短棒辐照试验方案设计与分析, 确定了铅铋合金层厚度、冷却水流道结构、阻力塞结构、冷却水流量等关键参数, 获得了热棒包壳最高温度为  $(490\pm 60)^{\circ}\text{C}$  的高线功率密度辐照试验方案。试验结果表明, 热棒最大线功率密度为  $68\sim 85\text{ kW/m}$  时, 包壳与燃料芯体温度满足辐照试验要求且留有余量; 在  $200\sim 300\text{ kPa}$  堆芯压差范围内, 相同压差下试验段流量的计算流体力学 (CFX) 计算值比试验值偏小  $9\%\sim 11\%$ ; 试验段外侧窄缝流道的流量份额为  $7.3\%$ , 显著低于该流道的流通面积份额, 满足线功率密度为  $85\text{ kW/m}$  时燃料短棒的冷却要求。本文提出的辐照试验方案可为快堆燃料棒的高线功率密度辐照试验提供参考。

**关键词:** 高通量工程试验堆 (HFETR); 燃料辐照试验; 快堆燃料棒; 热工水力

中图分类号: TL352 文献标志码: A

开放科学 (OSID) 标识码:



## Design and Analysis of Irradiation Test Scheme for Fast Reactor Fuel Slug with HFETR

Zhang Liang, Yang Wenhua, Zhao Wenbin, Sun Sheng, Jin Shuai, Lei Jin

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Considering the irradiation test index and fuel test safety, the operation requirements of high flux engineering test reactor (HFETR), the pressure difference fluctuation in the test section and other factors, in this paper, based on HFETR, the design and analysis of the fast reactor fuel slug irradiation test plan were carried out, and the key parameters such as the thickness of the lead-bismuth alloy layer, the structure of the cooling water channel, the structure of the thimble plug, and the flow rate of the cooling water were determined, and a high linear power density irradiation test plan with the maximum temperature of the hot rod cladding at  $(490\pm 60)^{\circ}\text{C}$  was obtained. The results show that when the maximum linear power density of the hot rod is  $68\sim 85\text{ kW/m}$ , the temperature of the cladding and the fuel core meets the requirements of the irradiation test and has a margin; In the range of  $200\sim 300\text{ kPa}$  core pressure difference, the calculated CFX value of the flow in the test section under the same pressure difference is about  $9\%\sim 11\%$  smaller than the test value; The flow share of the narrow channel outside the test section is  $7.3\%$ , which is significantly lower than the flow area share of the channel, meeting the cooling requirements of fuel slugs when the linear power density is  $85\text{ kW/m}$ . The irradiation test plan proposed in this paper can provide a reference for the high linear power density irradiation test of fast reactor fuel rods.

**Key words:** HFETR, Fuel irradiation test, Fast reactor fuel rod, Thermal-hydraulics

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-07-13

基金项目: 四川省青年科技创新研究项目 (2022JDTD0006)

作者简介: 张 亮 (1990—), 男, 工程师, 现主要从事研究堆辐照技术与反应堆物理研究, E-mail: 552181112@qq.com

## 0 前言

快堆是第四代先进核能系统的主要堆型<sup>[1]</sup>,也是未来实现闭式燃料循环的重要途径,而快堆燃料的研制则是研发快堆技术的重要环节。依据核燃料与材料研制的技术成熟度分级规则<sup>[2]</sup>,针对处于概念验证阶段(成熟度3级)或初步原理验证阶段(成熟度4级)的快堆燃料研发,可利用热谱研究堆开展类似原型堆环境下的辐照试验;对于原理验证阶段(成熟度5级)的快堆燃料研发,则需要在原型堆稳态环境下开展燃料元件辐照试验<sup>[2-3]</sup>。即便如此,对于成熟度较高的氧化物快堆燃料,国外也有基于热谱研究堆开展辐照试验的报道<sup>[4]</sup>。鉴于目前国内外快中子辐照资源不足的现状,针对新型快堆燃料元件的辐照试验需求,利用现有的热谱研究堆资源开展快堆燃料辐照试验成为了现实且合理的选择。对于成熟度较高的燃料,可以在热谱研究堆内创造出局部的类似快堆能谱的环境<sup>[5-6]</sup>来开展试验;对于成熟度较低的快堆燃料(如金属燃料),因主要研究燃料对燃料元件性能的影响,只需考虑其辐照温度满足原型堆要求即可,适合直接利用热堆进行辐照试验。

一般采用高中子注量率的热谱研究堆来开展快堆燃料辐照试验<sup>[4-6]</sup>,但是这类研究堆的冷却水温度仅30~70℃,远低于正常运行工况下快堆燃料棒的包壳温度(350~550℃)。为使试验燃料棒的包壳温度达到目标温度区间,可以通过在试验燃料棒外设置热阻层(如气隙结构)的方式来解决冷却水和包壳之间温度差异较大的问题<sup>[4]</sup>。然而,气隙厚度的精密控制存在较大困难,且气隙的热阻较大,使得燃料芯体温度较高。因此,一般气隙结构热阻层只适合燃料温度限值较高的陶瓷燃料棒辐照试验,且只允许较小线功率密度的燃料棒辐照试验。从加速燃料辐照速率、缩短辐照时间的角度考虑,则希望试验燃料棒的线功率密度尽可能大,因此,为同时满足包壳温度和高线功率密度的要求,需要研究新的解决方案。另一方面,就燃料辐照试验自身而言,除了满足燃料包壳温度要求外,还需要综合考虑研究堆实际运行状态、辐照试验安全风险、试验参数测量等因素,才能获得完善的燃料辐照试验方案。

为在热堆内开展快堆燃料辐照试验,基于

热谱的低温水冷高通量工程试验堆<sup>[7]</sup>(HFETR),针对快堆燃料短棒开展高线功率密度的燃料辐照试验方案设计与分析,并综合考虑HFETR运行要求、堆芯压差变化、试验段释热功率测量、燃料棒试验安全等因素,开展辐照装置方案设计与主要参数论证,以获得满足反应堆运行安全要求与辐照试验要求的辐照试验方案。

## 1 试验对象与辐照试验要求

试验用的快堆燃料短棒共9根,由环形燃料芯体、气腔、燃料包壳和上下端塞组成。燃料芯体为某型金属材料,芯体与包壳紧密贴合,芯体长度约为包壳长度的一半;包壳和短棒端塞的材料为马氏体不锈钢。辐照试验要求:研究堆满功率稳定运行时,组件中热棒包壳的最高温度为(490±60)℃;燃料芯体的温度须低于自身熔点且留有一定的安全裕量,正常运行时燃料芯体的温度限值为820℃;热棒的最大线功率密度为60~90 kW/m。

将9根燃料短棒放置在一个随堆辐照装置中以同时进行辐照,此装置试验段外径为63.0 mm,满足HFETR堆芯单栅元辐照孔道的尺寸要求。

## 2 辐照试验件设计与分析

### 2.1 结构设计方案

辐照试验件为容纳试验用燃料短棒的核心部件,其设计要求为:①HFETR满功率稳态运行时,热棒包壳最高温度满足辐照指标要求;②辐照试验件外表面最高温度不高于195℃<sup>[7]</sup>;③能够容纳各结构件因温度变化和中子辐照等原因产生的体积变化。此外,为缩短辐照时间,在设计时应允许辐照试验件具有尽可能高的燃料棒线功率密度。

辐照试验件采用了内含单根燃料短棒的设计,由燃料短棒、铅铋共晶合金(LBE)层、保护管、端盖、上定位块、下定位块等部件而成,其结构如图1所示。燃料短棒置于圆筒形不锈钢保护管的中心位置,两者的环形间隙内填充了LBE。辐照试验件上部留有气腔,用于容纳棒外LBE的体积变化。定位块用于燃料短棒的径向位置约束;上定位块顶部与上端盖底部的轴向装配间隙可容纳燃料短棒的轴向热膨胀与辐照肿胀。

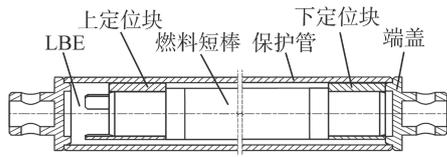


图1 辐照试验件示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Irradiation Test Piece

燃料芯体的裂变释热以及 LBE 和包壳等材料的伽马释热主要沿辐照试验件径向传递，通过冷却水冲刷并冷却保护管外壁面的方式带走热量。由于冷却水温度仅 20~50℃，主要利用保护管与 LBE 层的径向导热温差<sup>[8]</sup>将燃料包壳温度大幅度提高至快堆温度水平。在确定燃料短棒外径以及保护管厚度后，需要设计合理的 LBE 层厚度，从而使燃料包壳温度满足辐照试验要求。

## 2.2 热工分析与 LBE 层厚度设计

首先，采用一维多层圆柱导热模型（简称一维模型）开展辐照试验件的热工计算，以快速评估某线功率水平下具有不同 LBE 厚度的辐照试验件（含燃料短棒）各结构的温度；通过综合考虑包壳辐照温度要求与燃料芯体温度限值，获得初步的 LBE 厚度设计值；然后，采用计算流体力学（CFX）程序建立辐照试验件的三维模型并进行校核计算，得到完整的辐照件内温度场信息，并依此校核该辐照试验件设计是否满足辐照温度要求。

一维模型考虑了各材料（LBE、燃料芯体、不锈钢）热物性参数随温度的变化，利用预估迭代的方法确定导热系数和 LBE 密度。具体方法为：①初次计算时采用估计的材料定性温度，利用上述模型得到辐照试验件的径向温度分布；②基于初次计算结果，通过线性平均温度计算并更新相应结构的定性温度和热物性参数，最后求

解得到新的径向温度分布；③再次计算、更新定性温度并作比较，若连续 2 次计算得到的材料导热系数差异小于 0.01 W/(m·K)，则停止迭代，若不满足则继续迭代求解直至满足迭代终止条件。

辐照试验件外冷却水设计温度取 40℃，保护管外冷却水设计流速取 3.5 m/s，材料的伽马释热率取 1.5 W/g。根据本次试验的燃耗目标值，取目标燃耗燃料芯体的导热系数为零燃耗燃料的 48%。综合考虑包壳最高温度为 (490±60)℃、正常工况下芯体最高温度小于 820℃、芯体最大线功率密度为 60~90 kW/m 且留有一定的设计裕量这 3 种条件，经分析论证后取 LBE 层的设计厚度为 1.3 mm。一维模型和 CFX 程序计算得到的辐照试验件（含燃料短段）径向温度分布结果如表 1 所示。

由表 1 可知，与 CFX 程序计算结果相比，一维模型得到的包壳内侧最高温度偏高 24~28℃，燃料芯体最高温度偏高 16~25℃。这是因为一维模型利用迪贝斯-贝尔特公式（D-B 公式）得到的对流换热系数偏小，从而使得保护管外壁温度比 CFX 程序计算结果偏高 11~15℃；此外，一维模型忽略了芯体、包壳的轴向导热，也会导致包壳和芯体的温度结果偏高。

另一方面，由于燃料短棒温度随芯体线功率密度的增大而单调递增，结合一维模型结果比 CFX 程序偏高的情况，可利用一维模型结果评估线功率密度范围的上限值、利用 CFX 的结果评估下限值，从而保证给出的线功率密度范围在满足辐照温度要求的同时留有一定的设计裕量。由表 1 的数据可知，85 kW/m 时一维模型给出的包壳最高温度、芯体温度均达到或略小于辐照要求的上限值；68 kW/m 时 CFX 计算得到的包壳最

表 1 辐照试验件（含燃料段）温度分布计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Temperature Distribution of Irradiation Test Piece (Including Fuel Section)

燃料芯体 最大线功率密度/(kW·m <sup>-1</sup> )	零燃耗燃料芯体				目标燃耗燃料芯体			
	85		68		85		68	
计算方法	一维模型	CFX	一维模型	CFX	一维模型	CFX	一维模型	CFX
燃料芯体内侧温度/℃	674	649	566	543	801	785	674	654
燃料包壳内侧温度/℃	550	522	460	436	550	523	460	436
LBE层内侧温度/℃	476	453	401	380	476	453	401	380
LBE层外侧温度/℃	265	250	221	211	265	251	221	211
保护管外壁温度/℃	125	110	109	98	125	110	109	98

高温仅略高于辐照要求的下限值。因此,当芯体最大线功率密度范围为 68~85 kW/m 时,包壳最高温度满足 (490±60)℃ 的辐照指标且留有一定裕量,芯体温度小于正常运行的温度限值且留有裕量,保护管的外壁面温度小于 195℃ 且留有裕量。

### 3 辐照装置设计与分析

采用成熟的仪表化随堆辐照装置平台作为快堆燃料短棒随堆辐照装置,该平台由装置段和试验段组成,装置段包含了法兰组件、流量调节组件、孔板流量测量组件以及相关的仪器引线通道<sup>[9]</sup>,试验段则需根据辐照试验件特点进行重新设计。

#### 3.1 试验段结构设计方案

试验段位于堆芯单栅元孔道内,搭载了所有的辐照试验件,其设计要求如下:①试验段最大外径  $\Phi 63$  mm;②试验段外观形式与 HFETR 燃料元件基本一致,其上、下接头分别满足吊装工具及 HFETR 栅格板要求;③试验段具备试验段释热功率及其他参数的测量功能;④试验段的水力特性满足不同工况下快堆燃料短棒的冷却需求。

本文设计了横截面如图 2 所示的试验段,此试验段由外套管、隔热层、内套管、辐照试验件、堵流件、仪表管、阻力塞、混流器、上接头和下接头等组成。沿试验段轴向分 3 层布置辐照试验件,每层的 3 根辐照件的布置呈正三角形;同一径向位置的 3 层辐照件呈同轴布置;采用固定板固定辐照试验件和堵流件的位置。此布置方式将

形成 3 个圆环流道,因装配需要也会形成外侧窄缝流道和中心窄缝流道。

HFETR 的堆芯冷却水经装置段的进水口流入,流经流量调节组件、孔板流量测量组件后,经上接头进入试验段,再流经 3 层辐照试验件(受热升温后),最后经阻力塞、混流器和下接头流出后汇入堆芯下部腔室。试验段上、下部均布置有热电偶和引压管,用于测量试验段温升以及压差,根据测得的试验段冷却水温升与流量可得到试验段释热功率。

#### 3.2 试验段水力学设计与验证

试验段水力学设计的主要目标为:①在确保辐照试验件被有效冷却的前提下[即圆环流道的流速高于设计流速(3.5 m/s)],可适当提高试验段的冷却水温升,以降低热平衡法测量释热功率的不确定度;②通过合理设计试验段的阻力系数,使得一定堆芯压差范围内试验段流量均满足辐照件冷却需求且留有裕量。

尽管燃料短棒的线功率密度较大,但是 9 根燃料短棒的芯体总长度较小,因而整个试验段的释热功率不大。燃料芯体最大线功率密度范围为 68~85 kW/m 时,试验段的总释热为 47~55 kW。在圆环流道流速以及试验段释热功率一定的情况下,通过增大堵流件尺寸以缩小冷却水流通面积,进而减小试验段流量以获得更高的冷却水温升。辐照试验件外的 3 个圆环流道的宽度设计为 2.0 mm,2 个窄缝流道的宽度设计为 0.5 mm,则设计额定流速下,上述流道的流量之和为 5.55 t/h,依据热平衡法得到试验段的冷却水温升为 7.3~8.5℃,基本满足释热功率测量的要求。

试验段流量主要受装置进/出口压差、试验段结构阻力系数、流量调节机构开度的影响。装置进、出口压差近似等于堆芯压差,由 HFETR 的运行工况决定。在一个堆芯运行循环周期内,满功率稳定运行时的装置进、出口压差基本不变;不同运行循环周期下的装置进、出口压差存在差异,一般在 230~270 kPa 区间内,因此辐照装置的设计参考压差取 250 kPa。为严格满足辐照试验件的冷却流量需求,考虑到流量调节机构“全开”时,上述压差波动范围内的试验段流量均要求超过设计额定流量;另一方面,流量调节机构

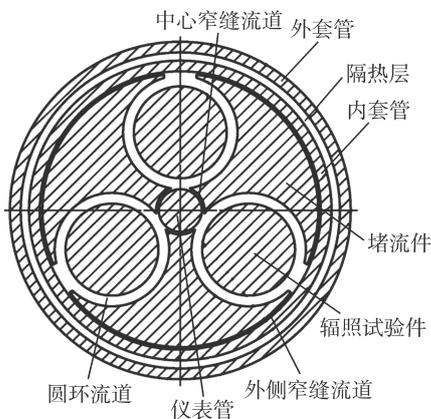


图 2 试验段横截面结构示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Cross Section Structure of Test Section

“全开”时，装置段的流动阻力较小，冷却水流量为 3~8 t/h 时的装置段压差仅 5~10 kPa，即试验段的压差范围可取为 220~260 kPa，因此，综合考虑试验段设计参考压差最终取值为 240 kPa。

由于试验段的上/下接头、混流器、辐照试验件的结构均已确定，需要依据试验参考压差来设计合适的阻力塞，并满足试验段压差波动时的流量需求。本文采用了多齿迷宫结构的阻力塞（图 3），不同的齿数或齿顶狭缝宽度可有效改变阻力塞的阻力系数。利用流动阻力计算公式<sup>[10]</sup>进行阻力塞流阻计算与结构选型评估，得到 1~2 个待选的阻力塞结构方案；再利用 CFX 程序对整个辐照装置进行建模与流动分析，以评价待选阻力塞结构的合理性；通过辐照装置的堆外水力学试验获得试验段压差-流量的测量数据，最终完成阻力塞的设计与试验段流量的验证。

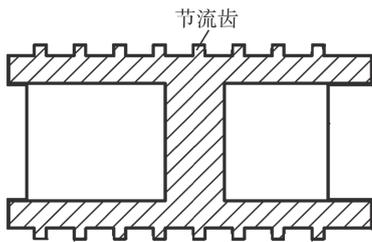


图 3 多齿迷宫型阻力塞结构示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of the Multi-tooth Labyrinth Thimble Plug Structure

在流量调节机构“全开”状态下采用 4 齿和 2 齿阻力塞时试验段流量-压差的 CFX 计算值与水力学试验值进行比较，见图 4。由图 4 可知，试验段压差在 200~300 kPa 范围内时，同一压差、同一齿数下得到的流量计算值比试验值偏小 9%~11%。依据试验结果可知，试验段设计参考压差下（240 kPa），应用 2 齿或 4 齿阻力塞时的试验段流量分别为 7.2 t/h 和 6.2 t/h；试验段压差波动范围内（220~260 kPa），2 齿或 4 齿阻力塞的试验段流量分别大于 6.9、5.9 t/h，均超出设计额定流量（5.55 t/h）。在设计参考压差下，4 齿阻力塞方案的试验段流量试验值具有一定的裕量（11%），在压差波动范围内可以满足最大线功率密度下燃料短棒的冷却需求；较之 2 齿方案，也减小了对装置流量调节机构的调节能力要求，因此选择 4 齿阻力塞作为本文的辐照试验方案。

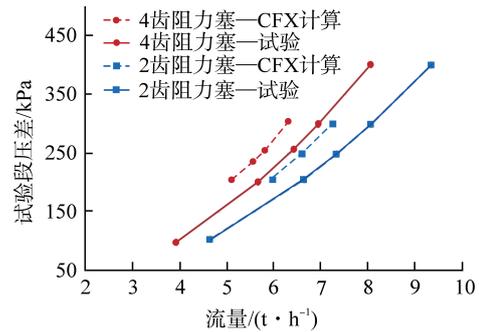


图 4 不同阻力塞时的流量-压差数据

Fig. 4 Flow-Pressure Differential Data for Different Thimble Plugs

#### 4 试验段的计算验证与分析

前文中设计额定流量对应的流速为整个试验段流道横截面上的平均速度。尽管试验段的多个流道属于并联流道且压差相同，但由于不同宽度流道的摩擦阻力差异，以及每层辐照件固定板处复杂流道结构的影响，流道横截面上流速分布不均匀，且不同流道的流速存在显著差异。试验段内不同流道的流量分配直接影响辐照件外冷却水的流速，从而影响对辐照试验件的冷却能力。因此，在开展辐照试验的燃料棒安全分析以及辐照试验时包壳温度的跟踪计算中，外侧窄缝流道的分流比例是重要的输入数据。

基于第 3 节确定的试验段结构、冷却水流道结构、阻力塞数量以及冷却水设计流量，利用 CFX 软件建立试验段流体域的详细模型并开展计算，以获得试验段的详细流场信息并验证设计流量下辐照件可否得到有效冷却。对中心窄缝流道进行简化处理，CFX 计算得的试验段横截面冷却水流速分布如图 5 所示。

由图 5 可知，外侧窄缝流道的流速显著低于圆环流道；圆环流道的速度周向分布不均，高流速区集中于中心位置。3 个圆环流道的主流速度 3.9~5.5 m/s，平均流速为 4.0 m/s；外侧窄缝流道的主流速度 1.3~1.7 m/s，平均流速为 1.4 m/s；3 个圆环流道的相对低流速区位于与外侧窄缝流道的汇流区域，但其流速仍高于设计额定流速（3.5 m/s）。经计算结果分析，外侧窄缝流道的流量占总流量的份额为 7.3%，显著低于其流通面积份额（18%）。外侧窄缝流道偏小的分流比例可使得额定流量下辐照件的冷却水流速高于设计额定流速；圆环流道更高的流速意味着更强的

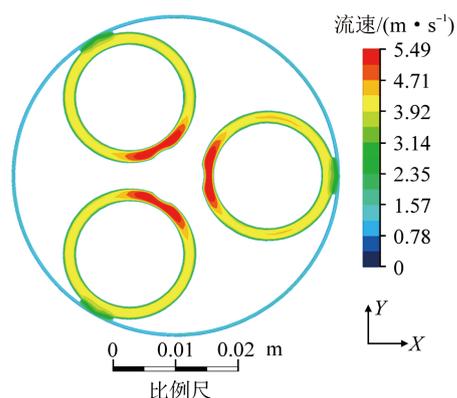


图5 试验段横截面流速分布

Fig. 5 Flow Velocity Distribution on Cross Section of Test Section

冷却能力，可满足最大线功率密度 85 kW/m 时燃料短棒的冷却要求且裕量更大。

## 5 结论与建议

基于低温水冷 HFETR 开展快堆燃料短棒的随堆辐照试验，依据辐照试验指标与堆运行安全要求，开展辐照装置设计与试验方案研究，获得如下结论：

(1) 提出的辐照试验件和试验段设计方案以及相关主要设计参数是在 HFETR 内开展高线功率密度快堆燃料短棒随堆辐照的合理试验方案；热棒芯体最大线功率密度范围为 68~85 kW/m 时，满足包壳最高温度为  $(490\pm 60)^\circ\text{C}$  的辐照试验指标且留有裕量，芯体最高温度小于正常运行限值且留有裕量。

(2) 在 200~300 kPa 压差范围内，相同压差下流量 CFX 计算值比试验值偏小 9%~11%。在缺乏试验装置水力学试验数据时，此偏差数据可为 CFD 方法计算类似阻力塞与试验段流动阻力的偏差提供参考。

(3) 试验段外侧窄缝流道的流量约占总流量的 7.3%，显著低于其流通面积份额。这意味着依据辐照件外流速和等面积分流假设确定的试验段额定流量下的辐照件外实际流速高于设计额定

值。此外，外侧窄缝流道的分流比例可用于辐照试验的燃料棒安全分析以及试验过程中包壳温度的跟踪计算。

对于快堆燃料研发后期的快谱辐照需求，建议开展基于热谱研究堆的能谱改造技术研究，并开发相应的快中子谱辐照试验技术。

## 参考文献：

- [1] LOCATELLI G, MANCINI M, TODESCHINI N. Generation IV nuclear reactors: current status and future prospects[J]. *Energy Policy*, 2013, 61: 1503-1520.
- [2] CARMACK W J, BRAASE L A, WIGELAND R A, et al. Technology readiness levels for advanced nuclear fuels and materials development[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2017, 313: 177-184.
- [3] CRAWFORD D C, PORTER D L, HAYES S L, et al. An approach to fuel development and qualification[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 371(1-3): 232-242.
- [4] MEDVEDEV P, HAYES S, BAYS S, et al. Testing fast reactor fuels in a thermal reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 328: 154-160.
- [5] CHRYSANTHOPOULOU N, SAVVA P, VARVAYANNI M, et al. Compilation of existing neutron screen technology[J]. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014, 2014: 395795.
- [6] CHRYSANTHOPOULOU N, SAVVA P, VARVAYANNI M, et al. Preliminary selection of device materials to locally transform thermal into SFR neutron spectrum[J]. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2018, 2018: 1896309.
- [7] 徐传效, 周永茂, 钱锦辉, 等. 高通量工程试验堆(HFETR)[C]//高通量工程试验堆(HFETR)运行十年(1980~1990)论文集. 四川: 四川科学技术出版社, 1991: 1-12.
- [8] 杨文华, 张亮, 斯俊平, 等. 燃料试样堆内辐照温度设计与实验研究[J]. *核动力工程*, 2018, 38(6): 43-48.
- [9] 杨文华, 赵国正, 张亮, 等. 高通量工程试验堆辐照试验能力和辐照试验技术[J]. *核科学与工程*, 2018, 38(6): 986-994.
- [10] IDELCHIK I E. Handbook of hydraulic resistance[M]. Redding: Begell House Inc., 2007: 624-625, 655-666.

(责任编辑: 周 茂)